Indice

Introduzione

Il lavoro descritto in questa tesi è stato svolto nell'ambito della collaborazione ARGO-YBJ che sta realizzando un rivelatore ad alta quota di Sciami Atmosferici Estesi (*EAS*) il cui compito principale sarà quello di studiare la radiazione γ.

L'astronomia dei raggi γ è una branca dell'astrofisica delle alte energie che si è sviluppata negli ultimi 20-30 anni. La radiazione gamma rappresenta la parte più energetica dello spettro elettromagnetico; quindi lo studio dei fotoni fornisce informazioni sui processi e sui fenomeni più energetici che avvengono nell'Universo.

Le prime osservazioni in questa banda dello spettro elettromagnetico sono state effettuate da quattro "telescopi" montati a bordo del satellite *CGRO* (Compton Gamma Ray Observatory). Un satellite, però, non è lo strumento più adatto per rivelare fotoni di energia superiore ai 100 GeV. Infatti il flusso dei raggi γ (almeno quelli di energia $\geq 30\ MeV$) è molto basso e diminuisce fortemente aumentando l'energia. I fotoni di energia superiore ai 100 GeV sono rivelati nel modo migliore da terra, ad un altezza $\geq 4000\ m$ per ridurre l'assorbimento dell'atmosfera, avendo contemporaneamente la possibilità di costruire al suolo strumenti di grandi dimensioni in grado di raccogliere un numero di fotoni sufficiente per avere una buona statistica.

I raggi cosmici che arrivano sulla Terra interagiscono con gli atomi che compongono l'atmosfera formando i cosiddetti sciami atmosferici estesi **EAS** (*Extensive Air Showers*). Le nuove tecniche di rivelazione dei raggi gamma che si sono sviluppate negli ultimi anni cercano di riprodurre l'immagine quanto più possibile dettagliata degli sciami atmosferici per ricavarne informazioni sulla natura, direzione ed energia del primario.

ARGO è un esempio di questo tipo di rivelatori (*ground-based experiment*) in grado di osservare sciami generati da fotoni nella banda di energia compresa tra 100 GeV e 10 TeV. Questo rivelatore, frutto di una collaborazione italo-cinese, è in corso di costruzione presso il laboratorio di raggi cosmici situato a Yanbajing (Lhasa, Tibet) ad una quota di $\sim$ 4300 m; sarà costituito da un tappeto di 1848 camere ad elettrodi piani resistivi *RPC* in grado di coprire un area di $\sim$ 6000 m^2.

Lo scopo di questa tesi è quello di caratterizzare i rivelatori RPC usati dall'esperimento ARGO-YBJ, e in particolare quello di certificare i primi RPC usciti dalla produzione in serie.

Dato l'elevato numero di RPC richiesti dall'esperimento, è stato necessario avviare una produzione in serie specifica per ARGO; questo però comporta il rischio che un eventuale difetto nella catena di montaggio si ripercuota su tutti i rivelatori dell'esperimento. Si capisce quindi l'importanza di effettuare delle misure di test sui primi esemplari di RPC prodotti per evidenziare eventuali errori di costruzione prima della messa in funzione dell'apparato. Questi test, inoltre, sono necessari per verificare che i rivelatori così prodotti rispettino tutte le caratteristiche previste dalla collaborazione.

In questa tesi verranno trattati i seguenti argomenti.

Il capitolo 1 contiene un compendio della fisica dei raggi cosmici nella quale l'esperimento ARGO può dare un contributo e gli obiettivi di fisica che si propone di studiare. Sono quindi evidenziate alcune caratteristiche dello spettro dei raggi cosmici e di seguito sono passate in rassegna le principali sorgenti di raggi gamma conosciute. Sono anche mostrati alcuni argomenti di fisica non di raggi γ a cui ARGO sarà in grado di dare un contributo, come la fisica del sole e dell'eliosfera ed il flusso di $\bar{p}$ ad energie dell'ordine del Tev.

La prima parte del capitolo 2 contiene una descrizione generale dell'apparato ARGO; nella seconda parte si prende in esame la sensibilità di ARGO agli obiettivi di fisica elencati nel capitolo 1.

Nel capitolo 3 viene presentato in dettaglio il funzionamento di un rivelatore RPC e successivamente ne viene descritta la struttura utilizzata dall'esperimento ARGO.

I capitoli 4 e 5 contengono lo studio originale oggetto della tesi. Nel capitolo 4 viene descritto il sistema di test usato per certificare i primi esemplari di rivelatori prodotti dalla fabbrica. Sono stati sviluppati, tramite il linguaggio di programmazione grafico Labview, una serie di programmi per il controllo tramite computer degli strumenti di laboratorio necessari alla misura di parametri fondamentali degli RPC, quali la corrente che scorre nella camera e la frequenza di conteggio delle PAD, e all'analisi delle cariche indotte.

Infine nel capitolo 5 vengono presentati i risultati dei test eseguiti sugli RPC dell'esperimento ARGO. Nella prima parte viene descritto uno studio effettuato sulla struttura meccanica del RPC di ARGO al fine di valutare l'efficacia di un'eventuale modifica alla struttura per limitare una deformazione non voluta. Nella seconda parte, invece, vengono presentati i risultati dei test effettuati sui primi esemplari di RPC prodotti in serie per l'esperimento ARGO.

Desidero, inoltre, porre l'attenzione sulle appendici A e B dove sono descritti in dettaglio i programmi sviluppati per l'acquisizione e l'analisi dei dati del test degli RPC.

Capitolo 1

Fisica ed obiettivi di ARGO

1.1 Astronomia di raggi γ ad alta energia

I raggi cosmici sono composti principalmente da nuclei di elementi leggeri ($\sim$ il 90% protoni e il 9% particelle α), il restante $\sim$ 1% è composto da nuclei pesanti. L'abbondanza e la tipologia degli elementi nei raggi cosmici varia, durante la propagazione dalle sorgenti alla Terra, a causa delle interazioni con il mezzo interstellare. Idrogeno, elio, ferro e carbonio, prodotti in grande quantità direttamente nelle sorgenti, sono detti primari, mentre titanio, vanadio, potassio e boro, prodotti per spallazione nel gas interstellare, sono detti elementi secondari. La maggior parte di questi è relativistica (energia confrontabile con la massa) e solo una piccola parte è ultrarelativistica (l'energia si estende fino a 10^{20} eV).

La provenienza dei raggi cosmici è una questione ancora oggi non completamente risolta. È chiaro tuttavia che buona parte di essi proviene dalla nostra Galassia ma lontano dal Sistema Solare e solo una piccola frazione ha origine nel Sole. Esistono poi raggi cosmici con energia molto più alta che hanno probabilmente origine extragalattica.

Lo spettro energetico differenziale delle varie specie di raggi cosmici può essere ben rappresentato da una legge di potenza:

$$N(E)dE = N_\circ \cdot E^{-\alpha}dE \tag{1.1}$$

con E > 1 GeV per nucleone e α che varia tra 2.5 e 2.7.

In figura 1.1 è mostrato lo spettro dei cosmici: sopra 10^{16} eV notiamo un cambiamento nella pendenza dello spettro, l'indice α diventa $\sim$ 3.0. Questo cambiamento, noto come il "ginocchio" dello spettro, avviene esattamente tra 10^{15} e 10^{16} eV [1]. La sua origine non è ancora ben chiara: la forte riduzione del flusso a queste energie comporta serie difficoltà nelle misure. Infatti il flusso, come si vede anche dalla figura 1.1, all'altezza del "ginocchio" è dell'ordine di una particella per m^2 per anno; quindi il tempo di esposizione necessario all'osservazione di un campione sufficiente di particelle è molto lungo e richiede rivelatori di grandi dimensioni.

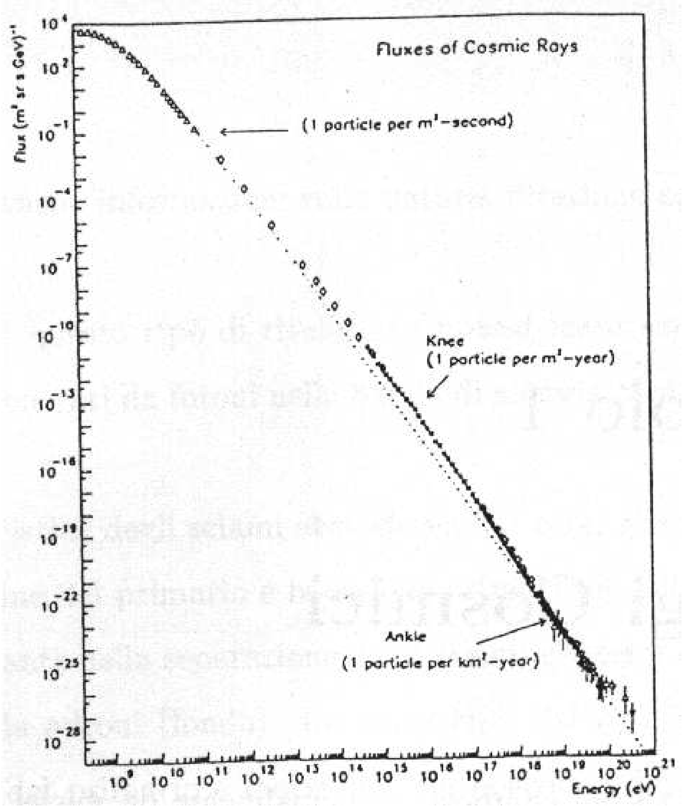


Figura 1.1: Spettro energetico dei raggi cosmici.

I raggi cosmici carichi sono deviati da campi magnetici galattici ($\sim\ 1\ \mu G$) o extra-galattici. Il raggio di curvatura di una particella di massa $m_{\circ}$ e carica Z che si muove in un campo magnetico uniforme B vale $r = 0.01 \times \frac{p}{ZB}$ dove p è l'impulso in TeV, B in μG, Z in unità di carica elettrica, e r in $parsec$. Quindi protoni con energia maggiore di $10^{18}\ eV$ che provengono da sorgenti nella nostra Galassia lontane $\sim\ 10\ kpc$ hanno perso la loro direzione originaria prima di arrivare sulla Terra.

Al contrario i raggi γ, essendo neutri, non sono soggetti a deviazioni e la loro direzione conserva l'informazione sulla provenienza. Quindi lo studio dei raggi γ è importante:

a) Per la ricerca di sorgenti di raggi cosmici.

b) Per lo studio di metodi di accelerazione dei raggi cosmici.

c) Per lo studio degli effetti di propagazione attraverso il mezzo interstellare o intergalattico.

I meccanismi di produzione dei raggi γ sono diversi:

1) Fotoni di energia dell'ordine del GeV sono prodotti essenzialmente per radiazione di sincrotrone e in quantità minore attraverso l'effetto Compton inverso (diffusione di un fotone di bassa energia per mezzo di elettroni ultrarelativistici).

2) Fotoni di energia dell'ordine del TeV sono prodotti sia da processi elettromagnetici (effetto Compton inverso) sia da processi adronici (fotoproduzione o interazione di protoni con un gas) che coinvolgono l'accelerazione di particelle figlie fino ad un'energia maggiore di $10^{14}\ eV$. Infatti nelle collisioni di particelle di alta energia con protoni o nuclei di atomi e molecole del gas interstellare si producono π^+, π^- e π°; π^+ e π^- decadono in $\mu^+\ \mu^-$ e questi a loro volta in $e^+\ e^-$ relativistici, mentre π° decade in $\gamma\gamma$.

Si definiscono raggi γ *High Energy (HE)* quelli la cui energia è compresa tra 30 MeV e 10 GeV, *Very High Energy (VHE)* fotoni la cui energia è compresa tra 10 GeV e 100 TeV ($10^{10}\ eV \div 10^{14}\ eV$) e *Ultra High Energy (UHE)* da 100 TeV a 100PeV ($10^{14}\ eV \div 10^{17}\ eV$).

Possibili sorgenti di raggi γ sono:

i) **Pulsar**

ii) **Resti di Supernova**

iii) **Nubi molecolari**

iv) **Nuclei Galattici Attivi**

v) **Fotoni diffusi lungo il piano galattico**

vi) **Gamma Ray Burst**

vii) **Il Sole**

1.1.1 Le Pulsar

Le Pulsar sono stelle di neutroni magnetizzate (B $\sim\ 10^{12}\ G$) che ruotano ed emettono principalmente nella banda radio con un periodo compreso tra 0.25 e 3 s. Hanno una massa non superiore a 3 $M_\odot$ e un raggio di $\sim\ 10\ Km$.

L'esperimento EGRET [1] operativo dal 1991 ha rivelato che 6 delle 550 RADIO-PULSAR conosciute sono sorgenti di raggi γ : Crab, Vela, PSR B1704-44, PSR B1951+32, Geminga, PSR B1055-52. Nella tabella 1.1 sono riassunte alcune caratteristiche delle Pulsar rivelate da EGRET.

[1] Situato a bordo del satellite Compton Gamma-Ray Observatory lanciato nell'Aprile del 1991, $E_{soglia} = 30\ MeV$

Pulsar	B(Gauss)	D(kpc)	L_γ(erg s^{-1})	α
Crab	$3.8 \cdot 10^{12}$	2.0	$3.9 \cdot 10^{34}$	2.15
Vela	$3.4 \cdot 10^{12}$	0.5	$1.7 \cdot 10^{34}$	1.70
PSR B1704-44	$3.1 \cdot 10^{12}$	1.8	$2.6 \cdot 10^{34}$	1.72
PSR B1951+32	$4.9 \cdot 10^{11}$	2.5	$1.4 \cdot 10^{34}$	1.74
Geminga	$1.6 \cdot 10^{11}$	0.25	$2.3 \cdot 10^{33}$	1.50
PSR B1055-52	$1.1 \cdot 10^{12}$	1.5	$9.3 \cdot 10^{33}$	1.18

Tabella 1.1: *Le 6 pulsar rivelate da EGRET come sorgenti di radiazione gamma. L_γ è la luminosità nell'emissione γ, B è il campo magnetico, D è la distanza delle Pulsar dalla Terra e α l'indice spettrale.*

Le misure compiute finora hanno mostrato l'esistenza di un taglio nello spettro energetico: il flusso dei γ con energia dell'ordine del TeV è due ordini di grandezza inferiore a quello registrato nella regione del GeV: sembra cioè che l'emissione gamma pulsata sia confinata ad energie sotto i 100 GeV.

Per quanto riguarda invece l'emissione continua di raggi γ, i risultati dell'esperimento EGRET mostrano l'esistenza di un buon flusso di γ ad energie del TeV solo per due delle sei pulsar: Crab e PSR B170-44; in questo caso, anzi, l'emissione ad energie del TeV è la componente principale dello spettro. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che queste pulsar, dette plerion, sono state create in seguito ad esplosioni di Supernova.

Si sa con certezza che la Crab è una sorgente di fotoni VHE fino a 15 TeV, ma l'intensità assoluta e la pendenza dello spettro non sono definiti. La misura di questi parametri è importante per la scelta del modello che spiega l'emissione continua. Il flusso della Crab misurato recentemente (1998) da WHIPPLE [2] è:

$$J_\gamma(E) = (3.20 \pm 0.17 \pm 0.6) \times 10^{-7} E_{TeV}^{-2.49 \pm 0.06 \pm 0.04} m^{-2} s^{-1} TeV^{-1} \tag{1.2}$$

Nella figura 1.2 è mostrato il flusso integrale dei raggi γ emesso dalla nebulosa Crab misurato da alcuni esperimenti tra i quali oltre allo stesso WHIPPLE [2], THEMISTOCLE [3], HEGRA [4], CANGAROO [5], ecc. Le curve rappresentano il modello di de Jager e Harding [3] che cerca di spiegare l'emissione gamma ad energie del TeV nelle

[2] telescopio Cĕrenkov situato a 2300 m sul Mt. Hopkins in Arizona, E_{soglia} = 300 GeV

[3] telescopio Cĕrenkov situato a Thémis in Francia, E_{soglia} = 3 TeV

[4] Rivelatore Cĕrenkov situato a La Palma, Isole Canarie con E_{soglia} = 500 GeV

[5] telescopio Cĕrenkov situato a Woomera in Australia, E_{soglia} = 1 TeV

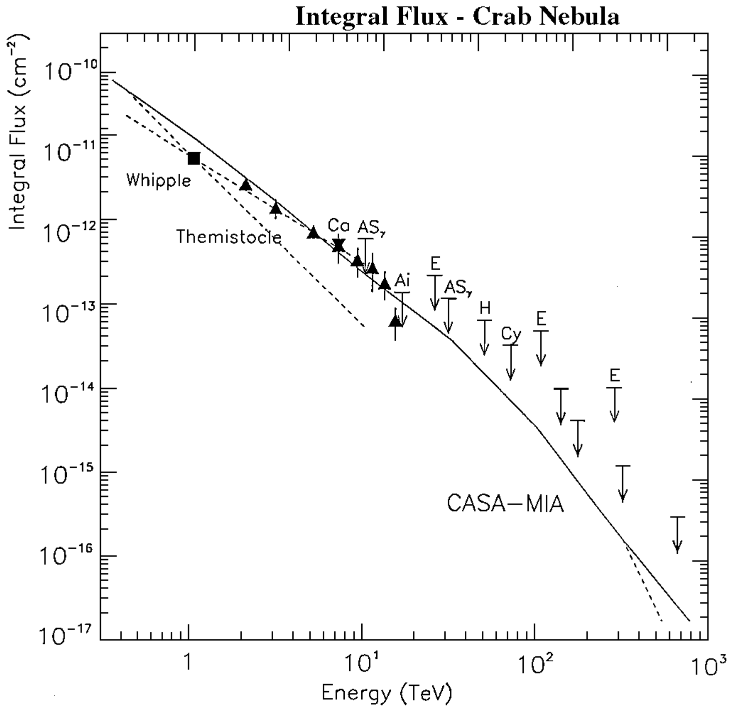


Figura 1.2: *Spettro di emissione dei fotoni VHE della nebulosa CRAB misurato da alcuni esperimenti. Ca (CANGAROO), H (HEGRA), E (EAS-TOP), Ai (AIROBIC),G (GREC), Cy (CYGNUS), As_γ (TIBET). La linea continua è il flusso calcolato con il modello di Jager e Harding.*

plerion: elettroni di alta energia emettono radiazione di sincrotrone mentre spiraleggiano attorno alle linee del campo nella nebula. I fotoni emessi sono successivamente accelerati per scattering Compton inverso fino ad energie del TeV.

1.1.2 Resti di Supernova

Il meccanismo responsabile dell'accelerazione dei raggi cosmici con energia fino a $10^{14}\ eV$ potrebbe essere l'espansione della materia prodotta dall'esplosione di una Supernova (SNR - SuperNova Remnant).

Questa è una delle poche sorgenti galattiche in grado di fornire la quantità di energia necessaria ai raggi cosmici e uno spettro compatibile con quello aspettato. Infatti l'esplosione di una supernova rilascia $\sim\ 10^{51}\ erg$ di energia, quindi la potenza media iniettata nel mezzo interstellare è $\sim\ 10^{42}\ erg\ s^{-1}$. Circa il 10% di questa energia potrebbe accelerare protoni e nuclei e produrre i raggi cosmici attraverso il meccanismo di Fermi. Con questo metodo di accelerazione le particelle cariche sono diffuse da irregolarità del campo magnetico galattico.

Misure dirette dello spettro dei raggi cosmici prodotti da SNR non sono possibili perché le particelle cariche sono deflesse dal campo magnetico interstellare su distanze (< 10 pc) molto inferiori alla distanza degli SNR (> 1 Kpc dalla Terra). Si studiano quindi i raggi γ prodotti dal decadimento dei mesoni π° nell'interazione dei raggi cosmici con altri nuclei del mezzo interstellare. Se gli SNR sono le sorgenti di raggi cosmici fino almeno a $10^{14}\ eV$, allora ci aspettiamo un'emissione gamma nella finestra energetica $GeV \div TeV$.

Secondo il modello di Drury at al. [4] e Naito e Takahara [5] il flusso aspettato dei raggi γ a energia > 100 MeV per SNR è:

$$F_\gamma(>E) \sim 10^{-10} \cdot A \cdot f_\alpha \cdot \Big(\frac{E}{1\,TeV}\Big)^{-\alpha+1} cm^{-2}s^{-1} \tag{1.3}$$

$$A \;=\; \theta\Big(\frac{E_{SN}}{10^{51}erg}\Big)\Big(\frac{d}{1Kpc}\Big)^{-2}\Big(\frac{n}{1cm^{-3}}\Big)$$

dove θ è la frazione di energia della supernova E_{SN} che viene utilizzata per la produzione dei cosmici, d è la distanza della sorgente, n è la densità dell'ambiente e $f_\alpha = 0.9 \div 0.2$ dipende dall'indice spettrale dei protoni accelerati. Secondo la relazione (1.3) la luminosità degli SNR più vicini dovrebbe essere tale da permettere ad esperimenti sensibili ai fotoni VHE di rivelarli. Per SNR in espansione all'interno di nubi molecolari con $n \ \geq\ 10^{2\div3}\ cm^{-3}$ la rivelabilità può essere aumentata grazie ad una densità maggiore ed una regione di emissione più compatta. Esempi di queto tipo di SNR nell'Emisfero Nord sono γ-Cygni e IC433.

EGRET ha rivelato 6 sorgenti con emissione gamma di energia superiore a 100 MeV. Altri esperimenti però, quali WHIPPLE, CYGNUS [6] e CASA MIA [7], che hanno preso in considerazione 5 delle 6 sorgenti osservate da EGRET non hanno riscontrato alcuna emissione gamma a queste energie. Una spiegazione di questo fatto potrebbe essere:

i) I raggi γ osservati da EGRET sarebbero originati da altre sorgenti (per esempio pulsar) e sovrapposti a SNR a causa della sua limitata risoluzione angolare.

ii) Le sorgenti rivelate da EGRET potrebbero provenire da SNR "giovani"; l'accelerazione potrebbe essere limitata dall'età e ciò comporterebbe la presenza di un taglio nello spettro.

[6] telescopio per sciami estesi situato a Los Alamos nel New Mexico, $E_{soglia} \sim 100 \div 300\ TeV$

[7] telescopio per sciami estesi situato a Dugway nell'Utah, E_{soglia} = 100 TeV

Recentemente CANGAROO ha rivelato un'emissione gamma ad energie del TeV in SN1006. La zona di emissione coincide con quella dove sono stati rivelati raggi X non termici da ASCA. Questi raggi X prodotti per radiazione di sincrotrone indicano la presenza di e^- di energia superiore a 50 TeV. Il segnale rivelato da CANGAROO è una conferma della possibilità di accelerare particelle ad E $\sim$ TeV in SNR. In questo caso però i γ sono prodotti da e^- non termici piuttosto che dal decadimento di π°.

1.1.3 Le nubi molecolari

La rivelazione di emissione gamma da nubi molecolari, poste lontano dal piano Galattico, può essere usata per lo studio della densità dei raggi cosmici e delle proprietà del mezzo interstellare. Il flusso aspettato dei fotoni proveniente da una regione localizzata del cielo è:

$$\phi_\gamma \sim A \cdot N(H_I) + 2 \cdot A \cdot N(H_2)$$

dove A è l'emissività dei raggi gamma attraverso l'idrogeno atomico, $N(H_I)$ e $N(H_2)$ sono le densità dell'idrogeno atomico e molecolare. Se la densità della materia interstellare entro la nube è nota da misure nell'infrarosso e nel radio e sono note anche le densità H_I e H_2, allora possiamo determinare la densità dei cosmici entro la nube.

L'emissione gamma da nubi molecolari è dovuta principalmente alle interazioni tra elettroni e protoni cosmici con la materia (bremsstrahlung elettronica e interazioni nucleone-nucleone) e, in misura inferiore, a interazioni di elettroni con fotoni di bassa energia. Il processo principale che contribuisce alla produzione di fotoni di energia superiore a pochi GeV resta comunque l'interazione di protoni cosmici con il gas interstellare.

Le nubi molecolari sono solitamente situate in prossimità di regioni con intensa attività stellare e abbondante formazione di stelle con massa grande. Nella tabella 1.2 ne sono elencate alcune poste entro 1 kpc dalla Terra le cui masse sono poco più grandi di 10^4 volte la massa del sole $M_\odot$.

Ne prendiamo in considerazione due in particolare, rivelate da COS-B [8] e da EGRET con una soglia di 10 MeV e fino ad un'energia di 10 GeV: Orion e Ophiucus, che si trovano lontano dal piano Galattico. Il flusso di γ osservato dalle regioni di più intensa emissione può superare $8 \cdot 10^{-5} cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}$, mentre l'emissione isotropa (extragalattica + interazioni dei raggi cosmici con gas ionizzato + contributo del processo di diffusione Compton inverso) è dell'ordine di $2 \cdot 10^{-5} cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}$. Poiché l'indice spettrale per energie comprese tra 100 MeV e 10 GeV è 2.1, estrapolando a 100 GeV si ottiene un flusso aspettato maggiore di $3 \cdot 10^{-8}$fotoni $cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}$. L'emissività dei raggi γ dalla regione di Ophiucus risulta essere maggiore rispetto a quella della nube di Orione, cosa che suggerisce che la densità locale di protoni da raggi cosmici varia di almeno il 30% sui $\sim$ 600 pc di distanza tra Orione e Ophiucus. Il motivo di questa differenza nella densità di elettroni e protoni da raggi cosmici non è chiaro.

[8]telescopio Cĕrenkov montato su satellite lanciato nel 1975, $E_{soglia} \sim 1 \div 10 GeV$

Regioni	M ($10^5 M_\odot$)	D (pc)	Regioni	M ($10^5 M_\odot$)	D (pc)
Aquila Rift	1.5	200	Lindblad Ring	1.6	300
Cloud A	0.4	500	Cepheus	1.9	450
Cloud B	0.4	300	Taurus	0.3	140
Cloud C	0.3	500	Orion A	1.6	500
Vul Rift	0.8	400	Orion B	1.7	500
Cyg Rift	8.6	700	Lupus	0.3	170
Cyg OB7	7.5	800	ρ Oph	0.3	165

Tabella 1.2: *Elenco di alcune nubi molecolari situate entro 1 kpc dalla Terra. M è la massa delle nubi in unità di 10^5 masse solari $M_\odot$, D è la distanza in parsec.*

1.1.4 Nuclei Galattici Attivi

I nuclei galattici attivi (AGN - Active Galactic Nuclei) sono gli oggetti compatti più energetici dell'Universo. Uno dei risultati più importanti di EGRET è stata la scoperta che molti AGN emettono raggi γ con uno spettro che si estende fino ad energie dell'ordine del GeV. In particolare 40 *AGN* sono stati rivelati con un buon livello di confidenza mentre 11 solo marginalmente; proprietà comuni a queste scoperte sono le seguenti:

i) Sono tutti membri della classe di blazar [9]contenente oggetti BL Lac, quasar altamente polarizzati (> 3%) e quasar rapidamente variabili otticamente.

ii) Lo spettro dei fotoni fino a 10 GeV è ben rappresentato da una legge di potenza $\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$ con l'indice spettrale che oscilla tra 1.5 e 3.0 senza alcun taglio nello spettro. La luminosità sopra ai 100 MeV può raggiungere 10^{49} $ergs^{-1}$ (assumendo un'emissione isotropa) e in molti casi è maggiore di quella nel resto dello spettro elettromagnetico.

iii) Le sorgenti di cui è noto il redshift hanno un valore di z compreso tra 0.03 e 2.23. La distribuzione in z delle sorgenti di raggi γ HE è simile a quella dei radio$-$quasar con spettro piatto.

iv) Molti *AGN* mostrano variabilità nella banda γ su intervalli temporali di giorni o mesi.

[9]I *blazar* sono le radiosorgenti extragalattiche la cui direzione di emissione è rivolta verso di noi.

Esistono molti modelli che si occupano di spiegare l'emissione γ negli AGN (modelli "leptonici" e "adronici") e differiscono per il tipo di particelle accelerate, la natura del bersaglio e i luoghi di produzione.

L'esperimento WHIPPLE, che ha preso in considerazione 35 sorgenti tra cui 15 di quelle osservate da EGRET ad energie del GeV, ha rivelato solo due sorgenti BL Lac (Mrk421 e Mrk501) ad un energia di soglia di 300 GeV con rispettivamente $\sim 1/3$ e $\sim 1/14$ del flusso della Crab.

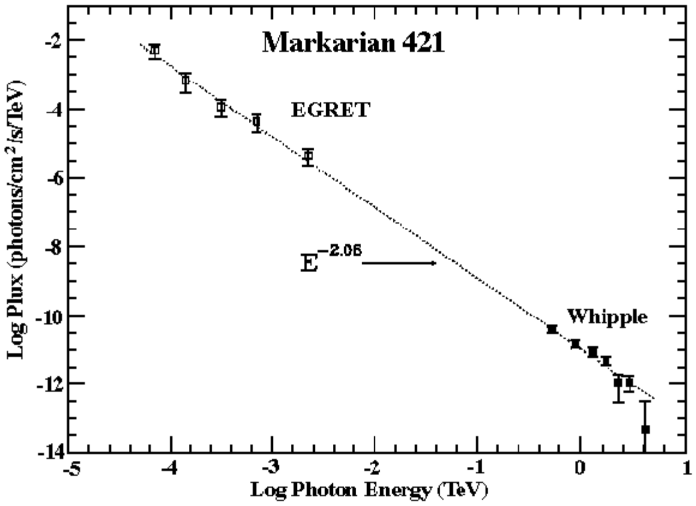


Figura 1.3: *Flusso di fotoni VHE da Mrk421 misurato da EGRET e da WHIPPLE.*

Osservando Mrk421 per 90 notti si è riscontrato tra il 14 e il 15 Maggio 1994 un aumento del flusso di un fattore 10 che ha portato Mrk421 ad essere più brillante della nebulosa Crab ad energie del TeV; dopo pochi giorni (~ 5) il flusso è tornato ad essere quello di prima. L'altra sorgente extragalattica osservata da WHIPPLE, Mrk501, non è stata invece rivelata da EGRET perché sotto la sua soglia di sensibilità. Tra Marzo e Luglio del 1995 WHIPPLE ha misurato un flusso di $(8.1 \pm 1.4)\cdot 10^{-12}$fotoni $cm^{-2}s^{-1}$ a 300 GeV di soglia [6] con una variabilità di qualche giorno. Queste misure sono state confermate poi da HEGRA [7] che ha misurato un flusso di $(2.3 \pm 0.4^{+1.5}_{-0.6})\cdot 10^{-12}$ fotoni $cm^{-2}s^{-1}$ sopra a 1.5 TeV ($\sim 1/3$ del flusso della Crab). Nel 1997 Mrk501 ha avuto un periodo di grande attività e tre esperimenti l'hanno misurata contemporaneamente: WHIPPLE, HEGRA e CAT [10]. Sembra possibile quindi che anche nel regime VHE sia presente una forte variabilità nel flusso come per le sorgenti osservate da EGRET.

[10]Telescopio Cĕrenkov situato a Thémis in Francia $E_{soglia} = 250\,GeV$

Dagli studi fatti si ricava che l'indice spettrale deve essere inferiore a 2.1. Ciò comporta la possibilità di osservare flussi di γ sopra 100 GeV anche dalle sorgenti rivelate da EGRET. WHIPPLE ne ha trovate solo due perché queste sono variabili nel tempo ed il suo ciclo di funzionamento non copre un vasto intervallo temporale (dura al massimo tre ore). Per verificare se il catalogo di AGN che emettono fotoni HE stilato da EGRET può essere valido anche per i VHE è necessario quindi avere a disposizione uno strumento continuamente attivo per un lungo periodo di tempo.

1.1.5 Radiazione diffusa

Una parte considerevole dei raggi γ rivelati non proviene da sorgenti puntiformi ma dall'interazione dei raggi cosmici con la materia interstellare (gas e polvere). Questa radiazione diffusa è concentrata principalmente nel piano galattico dove la densità di raggi cosmici e del materiale interstellare è alta.

Lo spettro dell'emissione galattica diffusa può essere descritto da una combinazione di bremsstrahlung elettronica, diffusione Compton inversa, e processi di interazione nucleone-nucleone che danno luogo a mesoni π° che poi decadono in due fotoni. Tuttavia ad alte energie il decadimento del π° è il principale meccanismo di produzione per i raggi γ.

Il flusso dei raggi γ sembra essere maggiore nelle regioni della Galassia interna ($|l| < 50^{\circ}$) piuttosto che in quella più esterna ($|l - 180^{\circ}| < 90^{\circ}$). La galassia esterna sembra mostrare un indice spettrale più piccolo di 0.4 (figura 1.4), cosa che potrebbe essere un'indicazione importante della crescita della vita media dei raggi cosmici nell'alone galattico.

Le misure compiute da EGRET seguono esattamente i modelli fino ad energie di $\sim$ 1 GeV; oltre questa energia invece l'intensità osservata è maggiore di quella aspettata. Questa discrepanza può essere spiegata assumendo un cambiamento nella pendenza dello spettro di $\sim$ 0.2 in corrispondenza delle regioni dove sono prodotti più raggi γ. Una seconda ipotesi è che per energie superiori a 1 GeV diventa dominante un'altra sorgente di γ diffusi: la diffusione Compton inversa di elettroni cosmici su fotoni "soffici"; però il flusso di elettroni cosmici richiesto deve essere significativamente maggiore di quello misurato localmente. Quindi questa seconda possibilità è accettabile solo nel caso in cui gli elettroni subiscano perdite di energia per radiazione nell'attraversare il mezzo interstellare. Invece per energie superiori ai 100 TeV i dati di CASA-MIA sembrano nuovamente accordarsi con la teoria; ciò significa che l'eventuale nuova sorgente dovrebbe essere attiva solo fino a queste energie.

1.1.6 Gamma Ray Burst

Un'altra possibile fonte di fotoni sono i cosiddetti "burst" di raggi γ (GRB - Gamma Ray Burst): questi sono brevi lampi di fotoni ($10^{-2} \div 10^{2}$ secondi) con energia compresa tra pochi KeV e poche decine di MeV e flusso associato di $\sim 10^{-6} \div 10^{-3}$ $ergcm^{-2}$. La

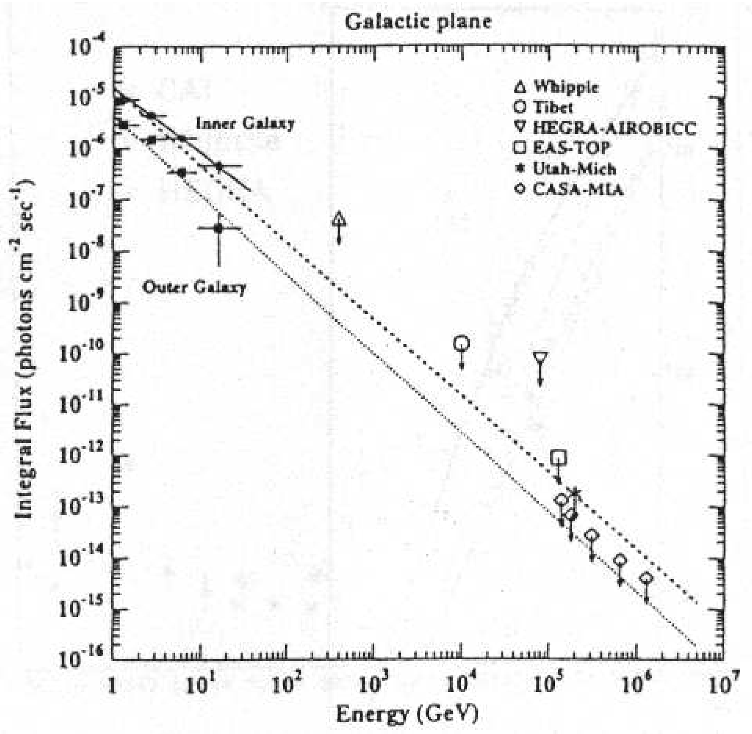


Figura 1.4: *Osservazioni e modelli teorici per l'emissione diffusa di raggi gamma dal piano galattico. Le misure di EGRET sono date dai punti pieni con la barra di errore, mentre i modelli per la Galassia interna ed esterna sono rappresentati dalle linee tratteggiate e punteggiate rispettivamente. La linea continua rappresenta il fit sui dati di EGRET per la Galassia interna e mostra che ad energie > 10 GeV lo spettro risulta più ripido. I punti vuoti con le frecce rappresentano le osservazioni nelle regioni della Galassia esterna effettuate dagli esperimenti indicati nella legenda e dati per mezzo di limiti superiori.*

loro origine è ancora oggi misteriosa; sono stati scoperti 25 anni fa ma ancora non ne conosciamo la distanza e ciò comporta un'incertezza nel determinare la luminosità intrinseca dei *GRB* di $\sim$ 10 ordini di grandezza.

I risultati più recenti ottenuti dall'esperimento BATSE [11] possono essere riassunti nei seguenti punti:

1) i GRB con energia compresa tra 20 KeV e 2 MeV sono stati rivelati al ritmo di circa uno al giorno;

2) per ogni burst non è stata trovata la controparte nel campo ottico, infrarosso, radio o dei raggi X;

[11] Situato a bordo del satellite Compton Gamma-Ray Observatory, $E_{soglia} = 20KeV$

3) la distribuzione dei GRB è isotropa, ma non è omogenea radialmente, cosa che indica un possibile spigolo della distribuzione;

4) i profili temporali mostrano un'enorme diversità nella forma totale, nella struttura dell'impulso e nella durata, denotando quindi che non esistono curve tipiche dei GRB;

5) lo spettro di energia può esser altamente variabile col tempo, e presenta i picchi ad energie > 100 KeV. Ad energie di poche centinaia di KeV lo spettro dei fotoni può essere approssimato da una legge di potenza troncata con un esponenziale $E^{-\alpha}exp(-E/E_{\circ})$, mentre ad energie maggiori (fino a 1 MeV) lo spettro è descritto da una semplice legge di potenza. In questa regione di energie l'indice spettrale varia tra -1.6 e -2.8 e il flusso tra 0.1 e 10 fotoni (> 1 MeV) $cm^{-2}s^{-1}$ (dati dell'esperimento COMPTEL montato sul satellite CGRO).

Centinaia di modelli ne descrivono il comportamento fisico ma solo due sono in accordo con il vincolo che la luminosità sia compresa tra 10^{28} e 10^{51} erg e che il burst di fotoni si esaurisca entro un intervallo di tempo breve ($10^{-2} \div 10^{2}$ sec):

i) Il primo pone sorgenti di GRB nell'alone galattico e presuppone l'esistenza di piccole esplosioni sulla superficie di stelle di neutroni.

ii) Il secondo invece ipotizza l'esistenza di sorgenti a distanze cosmologiche e quindi per spiegare l'enorme luminosità coinvolge eventi catastrofici come collisioni di stelle di neutroni.

Il modelo cosmologico è al momento il più favorito poiché richiede una luminosità della sorgente di $\sim 10^{51}$ erg. Il meccanismo più probabile sembra essere la collisione di stelle di neutroni. Poiché l'energia rilasciata è $\sim 10^{54}$ erg, l'energia convertita in fotoni è circa $10^{-4} \div 10^{-3}$ volte quella totale. Il numero di galassie a spirale all'interno del volume di spazio campionato da BATSE è dell'ordine di 10^{9}; la frequenza rivelata di $\sim 10^{3}$ GRB per anno implica quindi un evento per galassia ogni 10^{6} anni, in accordo con la stima di collisioni nelle galassie basata sui sistemi binari di pulsar. Inoltre questo modello prevede $z_{cut} \sim$ 2.5, in accordo con le osservazioni di BATSE.

L'osservazione di fotoni di alta energia potrebbe dimostrare che le sorgenti di GRB non sono a distanze cosmologiche perché essi verrebbero assorbiti per produzione di coppie durante il viaggio verso la Terra. Infatti secondo Salomon e Stecker [8](1998) il flusso di raggi γ di energia superiore a 500 GeV è fortemente ridotto se la sorgente ha un redshift z $>$ 0.1. Poiché il redshift minimo finora misurato per le sei galassie più vicine è z = 0.695 [9], anche assumendo che i *GRB* emettono nella regione del TeV, la maggior parte dello spettro osservato dalla Terra avrebbe un taglio ad energie minori di poche centinaia di GeV.

1.2 Altri obiettivi di fisica

1.2.1 Il sole

1. Campo magnetico dell'atmosfera esterna del Sole. Osservazioni dell'ombra del sole ad alte energie (> 200 GeV) permettono lo studio del campo magnetico esterno del Sole e la sua evoluzione temporale su periodi brevi (27 giorni) e lunghi (ciclo eliomagnetico di 22 anni).

2. Oscillazioni solari. La recente analisi sulla fluttuazione temporale del flusso di particelle ha mostrato uno spettro con linee ben definite. L'unica possibile spiegazione avanzata per spiegare i risultati sperimentali, suggerisce che l'oscillazione del flusso di particelle è causato da variazioni del campo magnetico solare ed interplanetario (IMF - Interplanetary Magnetic Field). Questa interpretazione è supportata dalla presenza di varie linee coincidenti nello spettro del flusso di particelle e nei dati dell'IMF. Queste fluttuazioni possono avere importanti implicazioni per vari aspetti della fisica interplanetaria, come, per esempio, l'accesso all'eliosfera dei raggi cosmici provenienti dalla galassia e la loro propagazione.

3. "Flares" solari. Gli eventi più energetici osservati sul Sole sono detti "flares" solari. Si tratta di bagliori improvvisi nei quali l'intensità di emissione continua è significativamente aumentata rispetto al fondo per pochi minuti. I flares emettono nelle bande radio, ultravioletto, X e γ oltre che nell'ottico. Forniscono una buona opportunità per studiare i processi di accelerazione di particelle cariche: sono dovuti infatti a collisioni di particelle di alta energia, principalmente protoni e ioni He^4 con il materiale presente nell'atmosfera del Sole. L'emissione gamma riguarda fotoni di energia compresa tra $4 \div 100\ MeV$ ma nel marzo e nel giugno del 1991 il satellite GAMMA 1 e l'esperimento EGRET hanno rivelato flares il cui spettro si estende fino a 30 GeV senza tagli. In figura 1.5 è mostrato lo spettro energetico ed il profilo temporale del flare osservato da GAMMA-1 il 15 giugno 1991.

   Queste particelle di alta energia arrivano sulla Terra dopo aver attraversato il mezzo interstellare; sono quindi soggette ad una serie di fenomeni interplanetari che ne modificano lo spettro energetico. Lo studio dell'intensità dei raggi cosmici a tutte le energie combinato con le misure del campo magnetico solare e interplanetario può fornire informazioni sulle variazioni della struttura dell'eliosfera.

4. Anisotropia dei raggi cosmici. Lo studio delle variazioni giornaliere dell'intensità dei raggi cosmici può dare informazioni sull'anisotropia della loro distribzuione nello spazio. Le variazioni giornaliere solari e siderali sono state osservate a varie energie. Ad energie più alte (circa 1 TeV) lo studio delle variazioni temporali siderali può dare informazioni sull'anisotropia al di fuori dell'eliosfera.

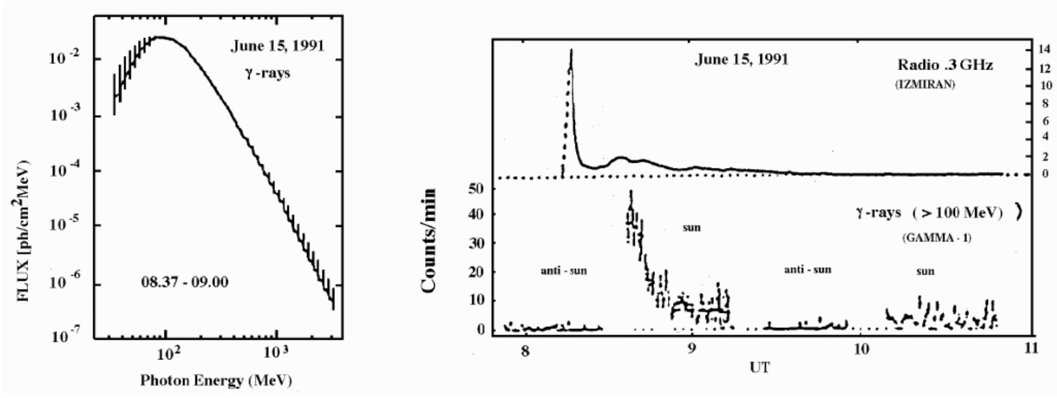


Figura 1.5: *Il γ-flare solare del 15 giugno 1991: lo spettro energetico dei raggi γ osservato dal satellite GAMMA-1 (sulla sinistra) e il profilo temporale dei raggi γ (sulla destra).*

1.2.2 Flusso di antiprotoni a $\sim$ 1 TeV di energia

Un importante obiettivo di fisica che può essere investigato da ARGO è il contenuto di $\bar{p}$ nei raggi cosmici ad energie dell'ordine del TeV. Flussi misurati ad energie < 1 GeV appaiono in accordo con le previsioni basate sui modelli di produzione locale. Ad energie più alte, invece, i risultati sono in conflitto con questi modelli: la frequenza misurata ad energie $1 \div 10$ GeV sembra essere troppo grande rispetto a quella aspettata dalle interazioni di protoni nella galassia. Stecker e Wolfendale hanno suggerito un contributo extragalattico al flusso di $\bar{p}$ [10]. Assumendo che i raggi cosmici ad alte energie abbiano origine extragalattica, questi autori hanno mostrato che il rapporto $\bar{p}/p$ dovrebbe aumentare dell' 1% a 500 GeV, e di più ad energie maggiori; una stima della sua dipendenza dall'energia è mostrata nella figura 1.6. L'effetto del vento galattico potrebbe cambiare la previsione nella regione del GeV, mentre non influenza la regione del TeV; per questo motivo una misura in questa regione dovrebbe permettere di scegliere una delle due ipotesi di produzione galattica o extragalattica.

1.2.3 Spettro dei protoni primari al di sotto del "ginocchio"

Il problema del comportamento dell'indice di potenza dello spettro energetico dei protoni primari calcolato tramite misure dirette, è stato ampiamente discusso negli ultimi anni. Un riassunto delle evidenze sperimentali è mostrato nella figura 1.7. La curva 1 rappresenta il fit ai risultati delle misure da satellite, mentre la curva 2 rappresenta lo

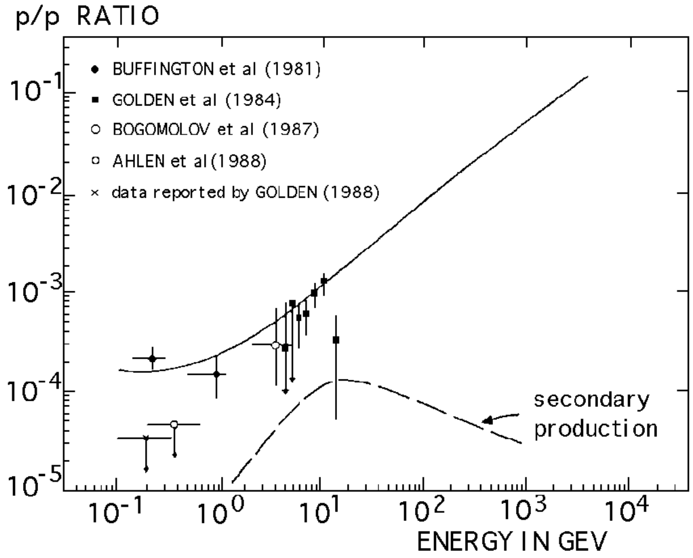


Figura 1.6: *Rapporto $\bar{p}/p$ come funzione dell'energia del protone. La linea continua rappresenta il modello extragalattico di Stecker e Wolfendale, mentre la linea trattegiata rappresenta il modello di produzione secondaria di antiprotoni.*

spettro ottenuto estrapolando i dati a basse energie ($< 1\,TeV$) agli sciami atmosferici al di sopra di $100\,TeV$.

Dato che lo spettro dei nuclei pesanti non mostra alcun taglio a queste energie, il cambiamento di pendenza nel flusso dei protoni potrebbe essere dovuto ad un cambio della natura della sorgente o ad una differente propagazione. Da un punto di vista sperimentale, queste misure ad energie $10 \div 100\,TeV$ sono in una regione di transizione tra la fattibilità di misure dirette e misure indirette su sciami atmoferici. Misure dirette soffrono di mancanza di statistica e di problemi di calibrazione; come misure indirette può essere usato lo spettro energetico dei muoni: poiché lo spettro dei muoni è collegato all'energia per nucleone e i protoni primari contribuiscono essenzialmente allo spettro dei nucleoni, un cambio in γ_p deve essere riscontrato nello spettro dei muoni.

1.3 L'esperimento ARGO

Per lo studio dei raggi γ VHE è necessario l'utilizzo di uno strumento in grado di compiere un monitoraggio continuo e sistematico del cielo e rivelare così sorgenti transien-

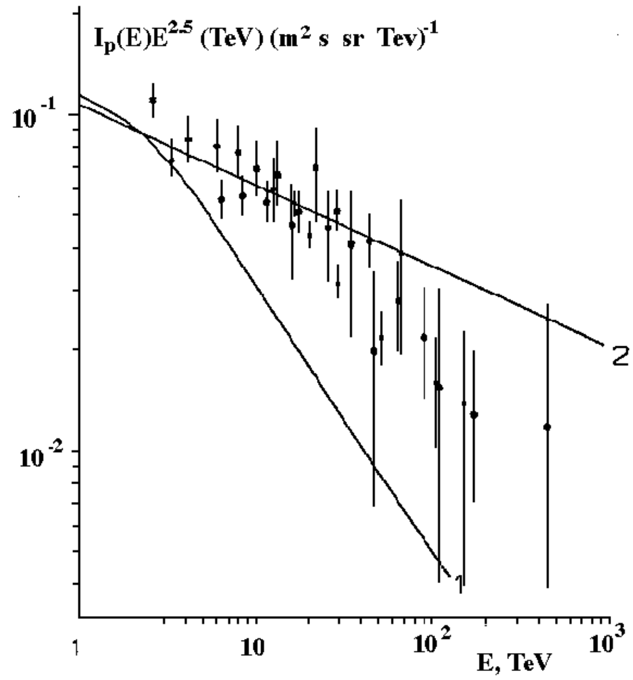


Figura 1.7: *Spettro energetico dei protoni primari.*

ti, attive cioè per tempi brevi, senza conoscerne a priori la posizione. A questo scopo si deve costruire un telescopio con eccellenti capacità di localizzazione delle sorgenti e di reiezione del fondo.

Il flusso di fotoni VHE, infatti, è basso: è dell'ordine di 10^{-7} $ergcm^{-2}s^{-1}sr^{-1}$ a 10 GeV e diventa solo 10^{-11} $ergcm^{-2}s^{-1}sr^{-1}$ a 100 TeV come si vede nella figura 1.8. In generale il fondo isotropo dei raggi cosmici ha un flusso superiore a quello dei fotoni (come si può notare confrontando le figure 1.1 e 1.8) ma "puntando" la sorgente, ossia selezionando una porzione di cielo intorno alla sorgente di raggi γ cercata, si ottiene una riduzione del fondo e si può compiere una misura. È necessaria comunque un'area attiva molto grande, circa 10^3 m^2, per poter ottenere un campione statisticamente significativo di fotoni in un tempo di osservazione ragionevole. Si potrebbe infatti adoperare uno strumento di superficie attiva più piccola come quelli montati su satellite o su pallone ma per raccogliere un numero sufficiente di fotoni bisognerebbe aspettare un tempo troppo lungo. Telescopi di queste dimensioni non possono dunque che essere costruiti sulla Terra.

Nel momento in cui i raggi γ di energia molto elevata interagiscono con le molecole

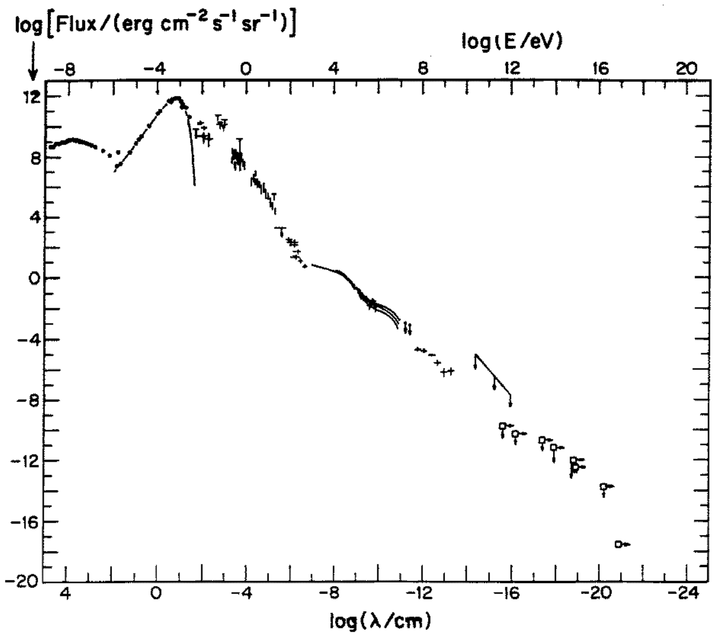


Figura 1.8: *Spettro della radiazione* γ*.*

dell'aria nell'atmosfera, si formano coppie elettrone-positrone che si dividono l'energia iniziale e queste a loro volta generano fotoni per Bremsstrahlung. I fotoni prodotti si convertono nuovamente in e^+e^- e il processo si ripete dando luogo ad uno sciame elettromagnetico nel quale il numero di particelle aumenta fin quando $E_{e^-} \sim E_c$ (energia critica) $\sim 85\ MeV$. Sotto questo valore diventa dominante il processo di perdita di energia per ionizzazione e il numero di particelle dello sciame comincia a diminuire. Sciami prodotti da primari con energia compresa tra 100 GeV e 10 TeV raggiungono il loro massimo sviluppo quando l'energia media dello sciame è E_c, in genere ad un'altezza dell'ordine di $10\ Km$ sul livello del mare. Sciami di energia < $10\ TeV$ sono già esauriti prima di raggiungere un rivelatore posto al livello del mare (figura 1.9).

Un telescopio situato a 2500 m di altezza è in grado di rivelare sciami con un'energia di soglia di $\sim 1\ TeV$. Invece a 4500 m si possono osservare sciami generati da primari fino ad un'energia di soglia di $\sim 100\ GeV$. Inoltre gli sciami iniziati da adroni hanno caratteristiche simili per molti aspetti a quelli iniziati da raggi γ. Quindi, a causa del loro flusso abbondante costituiscono un fondo importante per l'astronomia γ.

Un telescopio ideale per rivelare raggi γ VHE dovrebbe quindi avere le seguenti

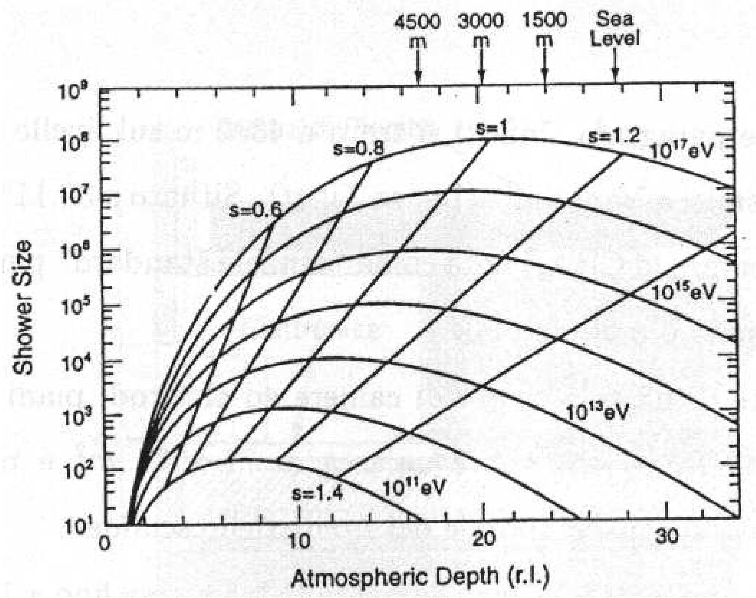


Figura 1.9: *Sviluppo longitudinale di sciami estesi nell'atmosfera terrestre.*

caratteristiche:

1) Ciclo di funzionamento 100%

2) Area attiva del rivelatore grande

3) Altezza sul livello del mare > 4000 m

4) Densità di campionamento elevata

5) Capacità di misurare molto velocemente il tempo di arrivo delle particelle

6) Possibilità di ricostruire l'immagine dello sciame

ARGO (Astrophysical Radiation Ground-based Observatory) è un rivelatore di sciami atmosferici estesi *EAS* costruito con l'obbiettivo di soddisfare alle caratteristche sopra elencate. Infatti si trova a 4300 m sul livello del mare nel laboratorio di raggi cosmici a Yanbajing (Lhasa, Tibet). Situato a $30.11°N$ e $90.53°E$ ha la possibilità di osservare la CRAB nota come "candela standard" perché sorgente di fotoni VHE il cui flusso è molto stabile.

I dati raccolti con ARGO permetteranno di studiare un ampio numero di temi fondamentali, tra i quali vi è:

- **Astronomia gamma** ad un energia di soglia di $\simeq 100\ GeV$. Possono essere monitorate più di 300 sorgenti candidate, galattiche ed extragalattiche, con un sensibilità migliore del 10% rispetto al flusso della CRAB.

- **Radiazione diffusa** dal piano galattico, **nubi molecolari** e **resti di Supernova** (SNR) ad energie $\geq 100\ Gev$.

- **Fisica dei Gamma Ray Burst (GRB)** consentendo l'estensione delle misure da satellite sull'intero campo di energia $Gev \div Tev$.

- **Fisica del Sole e dell' Eliosfera**, incluse le modulazioni dei raggi cosmici ad un energia di soglia di 10 GeV e il continuo monitoraggio della struttura su larga scala del campo magnetico interplanetario.

- **Rapporto $\overline{\text{p}}$/p** ad energie 300 $GeV \div \sim TeV$ non accessibili ai satelliti, con una sensibilità adeguata a distinguere tra modelli di produzione di $\overline{p}$ galattica ed extraglattica.

- **Lo spettro dei protoni primari** nella regione $10 \div 200\ TeV$, con una sensibilità sufficiente a rivelare un possibile cambiamento della pendenza dello spettro di energia.

Altri obiettivi vengono dall'uso di ARGO come un tradizionale rivelatore di EAS per valori di energie $10^{11} \div 10^{16}\ eV$. Poiché ARGO è in grado di fornire un'immagine del fronte dello sciame ad alta granularità, può essere compiuto uno studio dettagliato delle proprietà dello sciame, come per esempio eventi "multi-core" e distribuzione temporale degli EAS, con una risoluzione senza precedenti.

Capitolo 2

L'esperimento ARGO

2.1 Descrizione dell'apparato

L'elemento base dell'esperimento ARGO-YBJ [11] sono camere ad elettrodi piani resistivi *RPC* (Resistive Plate Counters) di dimensioni $280 \times 125\ cm^2$. Ogni RPC è collocato in un contenitore $282 \times 128 \times 5\ cm^3$ che racchiude il rivelatore RPC vero e proprio, le strisce di pick-up e l'elettronica di front-end (vedi capitolo 3). L'insieme di 12 camere rappresenta un'unità logica detta *CLUSTER* (vedi figura 2.1) di dimensioni $5.7 \times 7.9\ m^2$.

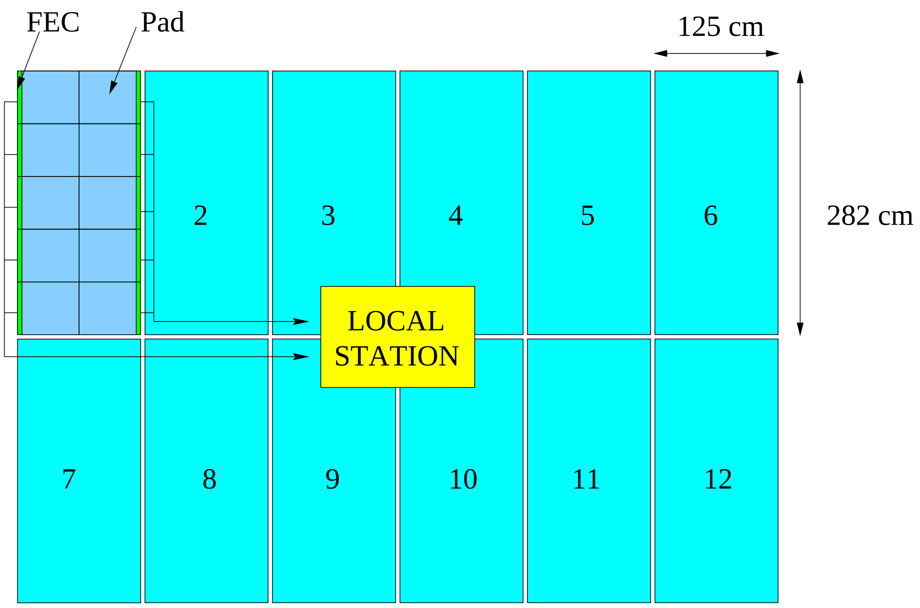


Figura 2.1: *Disegno schematico di un CLUSTER*

ARGO è costituito da uno strato di RPC, disposti su file parallele, che copre un'area di $\simeq 78 \times 74\ m^2$ e permette una ricostruzione dettagliata spazio-temporale del fronte dello sciame. Gli spazi vuoti tra le camere rappresentano $\sim 5\%$ della superficie garantendo quindi una buona copertura [12]. La parte centrale del rivelatore è circondata da un anello di RPC (vedi figura 2.2) che aumenta l'area attiva fino a $100 \times 100\ m^2$ così da permettere la ricostruzione di sciami con il "core" fuori della parte centrale (il core di uno sciame è il punto di interazione tra la traiettoria del primario e il piano orizzontale identificato dall'apparato).

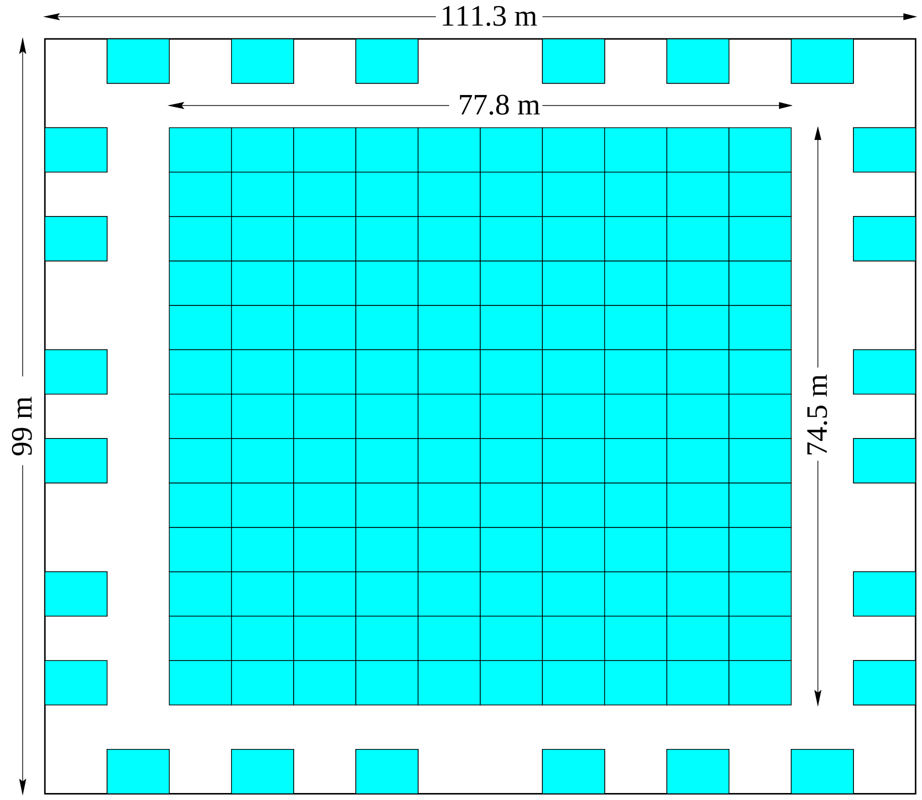


Figura 2.2: *Vista dall'alto del rivelatore ARGO-YBJ. Le aree scure rappresentano la parte attiva del rivelatore. I rettangoli rappresentano le unità logiche CLUSTER. ARGO è composto da 130 clusters nella parte centrale e 24 nell'anello esterno per un totale di 1848 RPC.*

Uno strato di piombo spesso 0.5 cm copre in modo uniforme il piano di RPC e, oltre ad assorbire gli elettroni di bassa energia, converte i fotoni in particelle cariche attraverso i processi di diffusione Compton e produzione di coppie. La componente γ degli sciami prodotti da fotoni è ~ 7 volte maggiore della componente di e^- ad una soglia di 1 MeV ($\sim$ 3.5 volte per distanze dal core < 50 m). La presenza dello strato di piombo aumenta il numero di particelle cariche convertendo i fotoni in e^+e^- e assorbe gli elettroni di bassa energia che, essendo più "lenti", deteriorano la risoluzione temporale (figura 2.3). Infatti possiamo osservare nella figura 2.3 che, ponendo uno strato di piombo sopra il rivelatore, più del 90% delle particelle cariche prodotte arrivano entro 4 ns dalla prima.

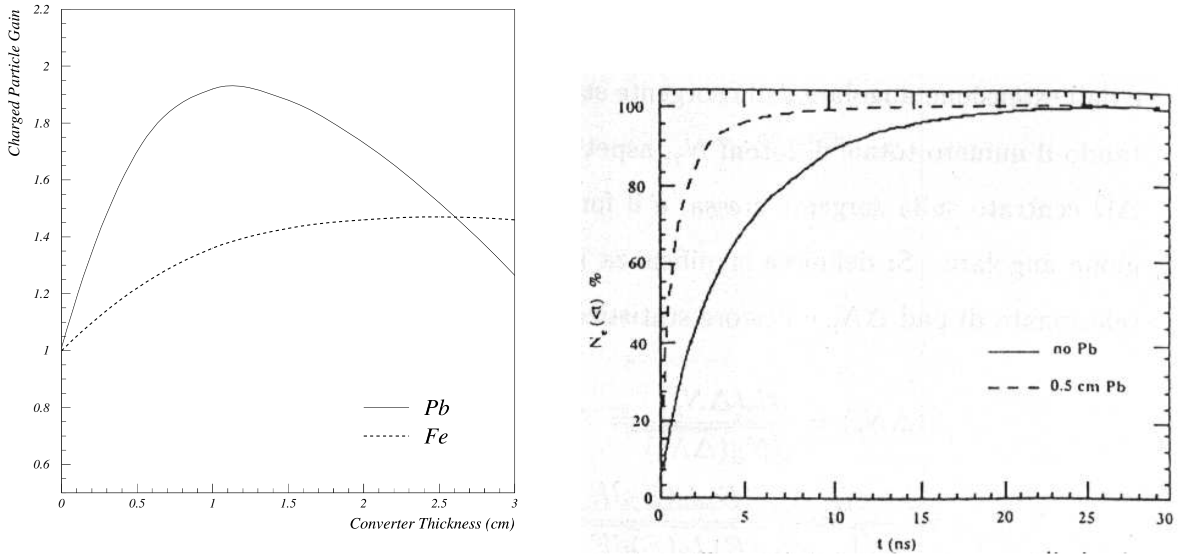


Figura 2.3: *A sinistra l'andamento del numero di particelle cariche ponendo uno strato di piombo oppure di ferro sopra il rivelatore in funzione del suo spessore. A destra la distribuzione temporale degli elettroni a distanze di 20 $\div$ 30 m dal core dello sciame con o senza lo strato di piombo.*

2.2 La sensibilità di ARGO all'astronomia gamma

L'abilità di ARGO nel rivelare sorgenti di raggi γ dipende dall'intensità dello spettro e dall'estensione angolare della sorgente stessa. La sensitività S è ottenuta confrontando il numero totale di fotoni N_γ aspettati dalla sorgente entro un angolo solido $\Delta\Omega$ centrato sulla sorgente stessa, e il fondo dei raggi cosmici N_B nella stessa regione angolare. Si definisce significanza il rapporto tra il segnale per un numero selezionato di PAD

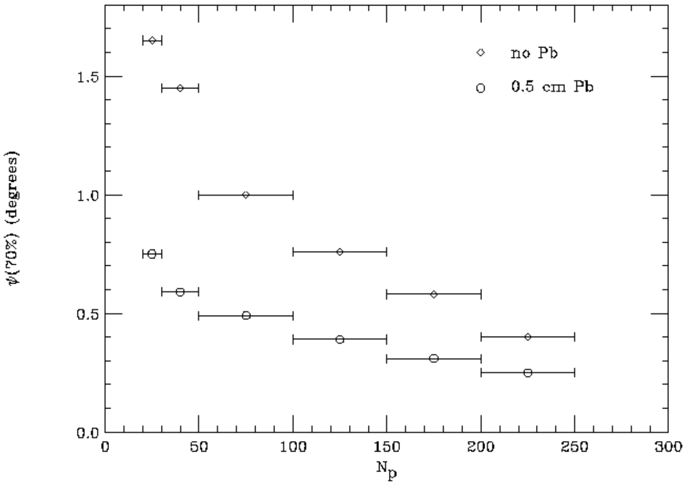


Figura 2.4: *Andamento della $\psi(70)$ in funzione delle PAD accese con o senza strato di piombo*

ΔN_p e l'errore statistico sul fondo:

$$S(\Delta N_p) = \frac{N_\gamma(\Delta N_p)}{\sqrt{N_B(\Delta N_p)}} =$$
$$\frac{\int_{E_1} A^\gamma_{eff}(E) J_\gamma(E) dE \cdot \xi_\gamma(\Delta\Omega) \cdot T(d) \cdot f(\delta)}{\sqrt{\int_{E_1} A^p_{eff}(E) J_B(E) dE \cdot \Delta\Omega(\Delta N_p) \cdot T(d) \cdot f(\delta)}} \cdot Q \qquad (2.1)$$

$J_\gamma(E)$ e $J_B(E)$ sono gli spettri energetici dei fotoni e del fondo, $A^\gamma_{eff}(E)$ e $A^p_{eff}(E)$ sono le aree effettive corrispondenti al numero di PAD fissato. Queste sono calcolate a partire dall'area attiva del rivelatore secondo la seguente formula:

$$A_{eff} = \frac{n}{N} \cdot A_g$$

dove, nel caso di eventi con il core interno all'area attiva A_g, N è il numero totale di eventi e n è il numero di eventi che soddisfa le condizioni di trigger (nel caso di core esterno all'area attiva, n è il numero di eventi che soddisfa le condizioni di trigger indipendentemenete dalla posizione del core dello sciame).

$\xi_\gamma(\Delta\Omega) = 0.70$ è la frazione di sciami prodotti da γ entro un angolo solido $\Delta\Omega = 2\pi(1 - cos\theta)$. Se la sorgente è puntiforme θ coincide con $\psi(70)$, l'angolo attorno alla direzione della sorgente che contiene il 70% del segnale; nel caso invece di sorgenti estese θ coincide con $\sqrt{(\psi(70))^2 + (\Delta\theta)^2}$ con $\Delta\theta$ la regione angolare del cielo interessata. In figura 2.4 è mostrato l'andamento dell'angolo $\psi(70)$ in funzione del numero di PAD accese per eventi con il core all'interno dell'apparato. Possiamo notare che se si considera lo strato di piombo, $\psi(70)$ è praticamente indipendente dall'energia del primario.

T(d) è il tempo effettivo impiegato per la raccolta di tutti i dati necessari, $f(\delta)$ indica per quanto tempo al giorno viene osservata la sorgente ad angoli inferiori a $40°$. Infine Q è un fattore che rappresenta l'efficienza di discriminazione tra γ e protoni.

La scelta di ΔN_p permette di selezionare una regione di energia: per esempio $\Delta N_p = 20 \div 50$ corrisponde ad una energia di $\sim 100 \div 200\ GeV$.

$f(\delta)$ è stato calcolato per ogni sorgente con declinazione 60 $< \delta <$ 0. Può variare da 6 $\div$ 7 ore per sorgenti verticali ($|\ \delta - \lambda\ | \leq 10°$ con $\lambda = 30°$ latitudine di Yanbajing) fino a 2 $\div$ 3 ore per sorgenti osservate ad angoli $> 30°$. Esaminiamo ora i risultati ottenuti applicando questi criteri alle sorgenti di raggi γ introdotte nel capitolo 1.

2.2.1 Le Pulsar

a) *La Crab.* Il flusso dell'emissione non pulsata di raggi γ dalla Crab è osservato selezionando eventi di alta moteplicità (> 20 PAD accese). Nella tabella 2.1 è riportato il tempo di osservazione necessario alla rivelazione di un segnale a 5 σ e in figura 2.5 è rappresentato lo spettro di energia dei fotoni rivelati.

$\Delta N_p(PAD)$	20÷50	50÷150	150÷250	> 20	> 250
E_m (GeV)	150	350	900	100	1000
T(giorni)	60	60	250	30	90
N_γ(1 anno)	5900	2300	700	9350	450

Tabella 2.1: *Tempo di osservazione della Crab a 5 σ per diversi intervalli di PAD (ARGO - 3600). E_m è l'energia media corrispondente al numero di PAD selezionate, T il tempo di osservazione, N_γ il numero di fotoni.*

La Crab può essere osservata da ARGO anche selezionando eventi di bassa molteplicità ($11 \div 20$ PAD accese) ad un'energia media di 100 GeV ma con una sensibilità di 4.5 σ in un anno di lavoro.

b) *PSR B1951+32.* Lo spettro di emissione pulsata di questa sorgente, così come rivelato da EGRET, non mostra tagli in energia fino a 20 GeV. Assumendo che si

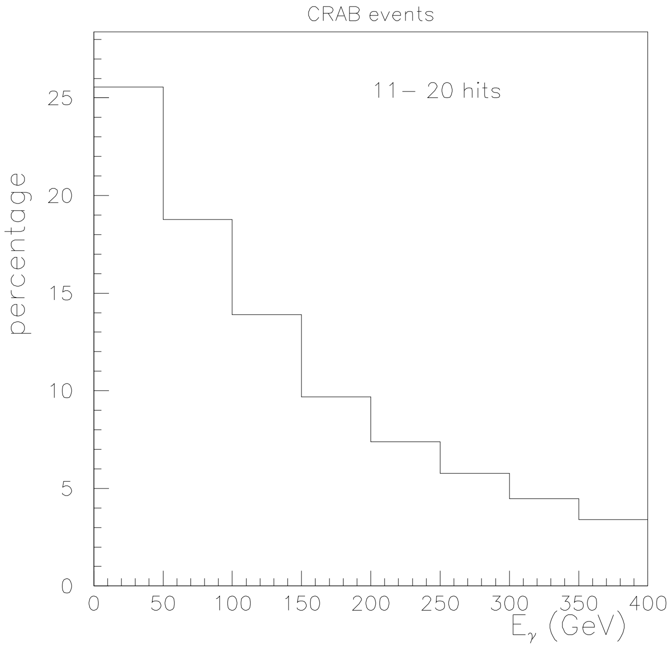


Figura 2.5: *Distribuzione dell'energia frazionale dei fotoni dalla direzione della Crab rivelati da ARGO usando usando la selezione di bassa molteplicità (11÷20 PAD).*

estenda almeno fino a 100 GeV potrebbe essere marginalmente rivelata da ARGO a 4.3 σ in un anno di presa dati con un trigger di 20 $\div$ 50 PAD accese.

2.2.2 SNR

I resti di Supernova non sono sorgenti puntiformi bensì hanno un diametro che oscilla tra $\sim 0.4°$ e $\sim 3.2°$ confrontabile con la risoluzione angolare di ARGO. Sono circa 30 gli SNR che possono essere osservati alle latitudini di Yanbajing, e 6 di queste (elencate nella tabella 2.2) sono sorgenti di raggi γ rivelate da EGRET.

Partendo dai flussi misurati da EGRET a 100 MeV di energia di soglia, è possibile calcolare il flusso di fotoni nella regione $GeV \div TeV$ utilizzando l'equazione 1.3. È stata stimata così la sensibilità di ARGO a fotoni di energia tra 100 e 700 GeV selezionando eventi con (20÷50) e (50÷150) PAD accese e ponendo $\theta = \sqrt{(\psi(70))^2 + (\Delta\theta)^2}$ con $\psi(70)$

SNR	$\delta(^\circ)$	Estensione Angolare (gradi)	$\Phi_\gamma(> 100MeV)/10^{-7}$ (cm^2s^{-1})
W63	+45 20	1.3	1.5
γ-Cygni	+40 14	1.0	13.4
IC443	+22 36	0.8	4.3
W44	+01 18	0.5	7.4
W51	+14 00	0.4	2.0
Monoceros	+06 30	3.0	2.2

Tabella 2.2: *SNR rivelati da EGRET. $\delta(^\circ)$ è la declinazione delle sorgenti e $\Phi_\gamma(> 100MeV)/10^{-7}$ cm^2s^{-1} il flusso integrale a 100 MeV di soglia.*

scelto in base al numero di PAD. I risultati sono riportati nella figura 2.6 dove le curve rappresentano il flusso minimo a 100 MeV, Φ_γ(> 100 MeV), necessario per rivelare sorgenti a 5σ in funzione di θ, ossia la sensibilità di ARGO, in due configurazioni, al flusso di fotoni con uno spettro $\sim E^{-1.3}$ e $\sim E^{-1.4}$. W44 e γ-Cygni dovrebbero essere visibili da ARGO anche se lo spettro è più ripido di $\sim E^{-1.4}$ fino a 700 GeV, mentre IC443 dovrebbe essere parzialmente osservabile a patto che il suo spettro energetico sia abbastanza piatto, $\sim E^{-1.3}$.

Più del 70$\%$ del segnale è dovuto a fotoni con energie minori di 500 GeV, perciò ARGO potrebbe essere sensibile anche a uno spettro energetico con un taglio a queste energie.

2.2.3 Nubi molecolari

La maggior parte delle nubi molecolari citate nella tabella 1.2 sono osservabili alle latitudini di Yanbajing. Tra queste ci sono sia quelle che si trovano nel piano galattico (Vul Rift, Cygn Rift), sia quelle situate lontano dal piano galattico (Taurus, Per OB2).

EGRET ha rivelato emissione γ da Ophiucus e Orion fino a 10 GeV, ma non ci sono dati ad energie più alte neanche da altre sorgenti. Inoltre la natura diffusa delle emissioni rende difficile l'osservazione di queste sorgenti anche per telescopi Cĕrenkov. ARGO rappresenta quindi un'occasione unica di studiare emissioni γ anche ad energie superiori di molte centinaia di GeV ai risultati di EGRET.

Lo spettro dei fotoni rivelati da EGRET segue una legge di potenza $\sim E^{-2.1}$; estrapolando a 100 GeV otteniamo che il flusso a queste energie è rivelabile da ARGO. La

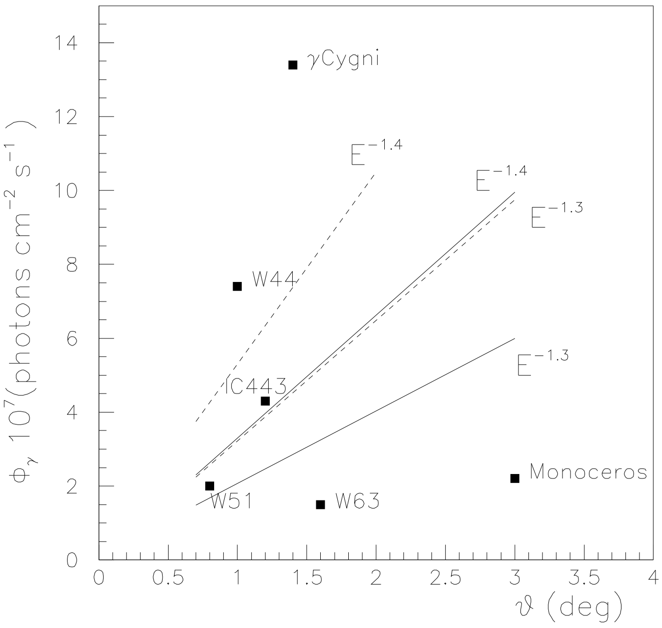


Figura 2.6: *Il flusso minimo Φ_γ(> 100 MeV) necessario per rivelare sorgenti a 5 σ in funzione di θ apertura angolare attorno alla direzione. Le curve tratteggiate rappresentano la sensibilità di un apparato di 14400 m^2 in un anno di osservazione mentre quelle continue sono per un apparato di 3600 m^2 in due anni di presa dati. La sensibilità di ARGO ($\sim 5700\ m^2$) la otteniamo scalando di un fattore 1.6 quella dell'apparato di 3600 m^2. I quadratini neri rappresentano i valori del flusso misurati da EGRET per SNR.*

sensibilità di ARGO per emissione diffusa è ottenuta scegliendo eventi con (11$\div$20) PAD. Nella figura 2.7 è rappresentata la sensibilità a 5 σ in due anni di lavoro in termini del flusso a 100 MeV e della dimensione angolare della sorgente per tre indici spettrali (x = 2.1,2.3,2.5).

2.2.4 Radiazione diffusa

Come è stato già detto l'intensità dei fotoni diffusi nel piano galattico dipende dalla longitudine galattica: nella Galassia esterna il flusso è maggiore rispetto a quella interna ad energie superiori 10 GeV. Due zone della Galassia sono osservabili da Yanbajing: $30° < l < 100°$ e $150° < l < 220°$. Per calcolare la sensibilità è stata presa in considera-

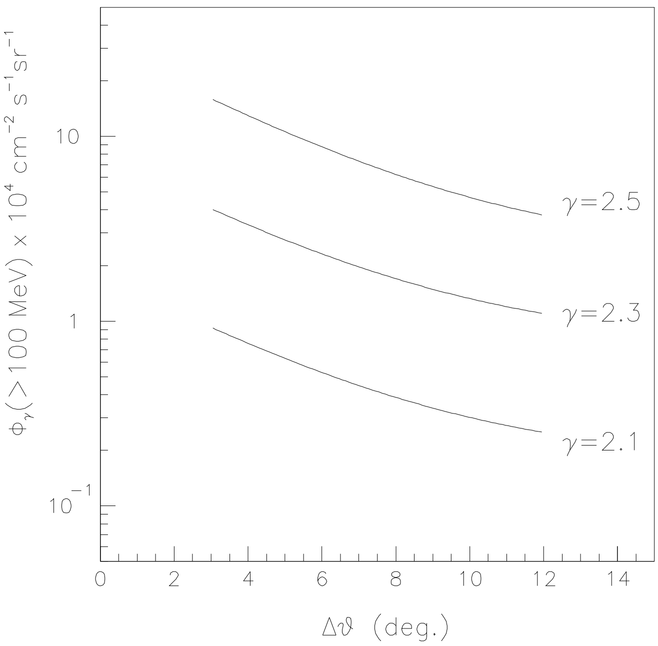


Figura 2.7: Φ_γ(> 100 MeV) *necessario per rivelare sorgenti a 5 σ in due anni, in funzione dell'estensione angolare per un apparato di 3600 m^2. Il flusso rivelato da ARGO si ottiene scalando di un fattore 1.6. Le curve si riferiscono ad un' emissione di fotoni con spettro $E^{-2.1}$,$E^{-2.3}$, $E^{-2.5}$ fino a 700 GeV.*

zione l'intensità aspettata dei fotoni nella Galassia interna estrapolata con uno spettro $E^{-2.5}$. La selezione in PAD (20÷50) permette di scegliere eventi con un'energia superiore a 500 GeV: infatti $\sim 72\%$ del segnale proviene da eventi con energia > 300 GeV; è stato assunto un tempo di osservazione di 4.5 ore al giorno.

Il flusso di fotoni proveniente da una regione larga $\sim\ 3°$ in latitudine e $\sim\ 10°$ in longitudine con un tempo medio di osservazione di 4.5 ore al giorno dovrebbe essere osservata a 5 σ in 8 mesi ad un'energia media di 200 GeV.

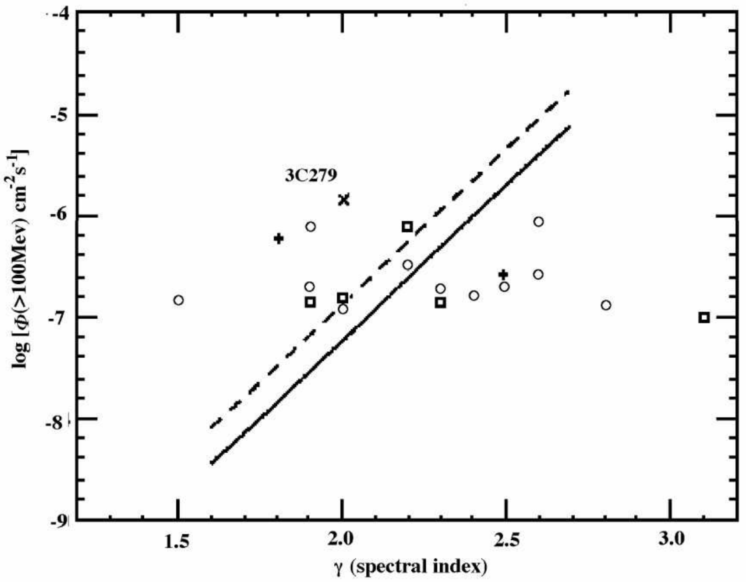


Figura 2.8: *Il flusso minimo a 100 MeV di soglia, $\Phi_\gamma(> 100\ MeV)$ necessario per la rivelazione di sorgenti a 5 σ in un anno, in funzione dell'indice spettrale. La linea continua è il risultato per un apparato di 14400 m^2, quella tratteggiata per un apparato di 3600 m^2; i valori di ARGO si ottengono scalando di un fattore 1.6 il risultato del secondo. I punti rappresentano 19 sorgenti osservate da EGRET e visibili anche a Yanbajing con $\theta < 30°$; con i cerchi sono indicate sorgenti con redshift $z < 0.5$,con i quadrati $0.5 < z < 1$, con le croci $z > 1$.*

2.2.5 Sorgenti extragalattiche AGN

La forma dello spettro degli AGN dipende sia dall'energia massima raggiungibile dai primari nelle sorgenti sia dalle interazioni di questi con il fondo di fotoni infrarossi; di conseguenza la pendenza varia moltissimo e non è facile fare delle previsioni.

Per ottenere una stima della capacità di ARGO nel rivelare fotoni provenienti da AGN, in un anno di lavoro e con un segnale di 5 σ superiore al fondo, è necessario calcolare il flusso medio di una sorgente con spettro $E^{-\gamma}$ che si estende senza tagli fino a 700 GeV. Si selezionano poi eventi con (20÷150) PAD accese. I risultati sono mostrati nella figura 2.8 nella quale il flusso integrale ad energie maggiori di 100 MeV è espresso in funzione dell'indice spettrale. Nella stessa figura sono rappresentate anche 19 sorgenti visibili a Yanbajing con $\theta < 30°$. Molte di queste potrebbero essere rivelate da ARGO assumendo che il loro spettro si estenda fino a 500 GeV senza effetti di assorbimento.

Per quanto riguarda invece la sensibilità di ARGO nel rivelare sorgenti il cui spettro è dominato dall'assorbimento dovuto alla presenza di un fondo di fotoni infrarossi si studiano gli spettri di Mrk 421 e 3C454. Mrk 421 (z=0.031) è stato rivelato sia da EGRET che da WHIPPLE. Quindi, combinando i risultati delle loro misure, si ottiene l'andamento dello spettro $1.2 \cdot 10^{-4} \cdot E^{-2.06}$ fotoni $cm^{-2}s^{-1}TeV^{-1}$ fino a $\sim$ 2 TeV; lo spettro di 3C454 (z=0.86), invece, è dominato da effetti di assorbimento per energie maggiori di 100 GeV. Il rapporto dei flussi integrali $\Phi_\gamma^{3C454}(> E)/\Phi_\gamma^{Mrk421}(> E)$ è circa 4.4 a 10 GeV, ma solo 0.2 a 400 GeV (vedi figura 2.9). Pertanto 3C454, pur essendo la sorgente AGN più luminosa rivelata da EGRET, risulta molto debole ad energie $\sim 400\ GeV$ (WHIPPLE). La sensibilità di ARGO è ottenuta selezionando eventi con (20÷150) PAD accese. La sorgente 3C454 è rivelata se il segnale supera le fluttuazioni statistiche del fondo di 5 deviazioni standard in $\sim$ 4 mesi di osservazione; invece la rivelazione di Mrk 421 richiede $\sim$ 9 mesi.

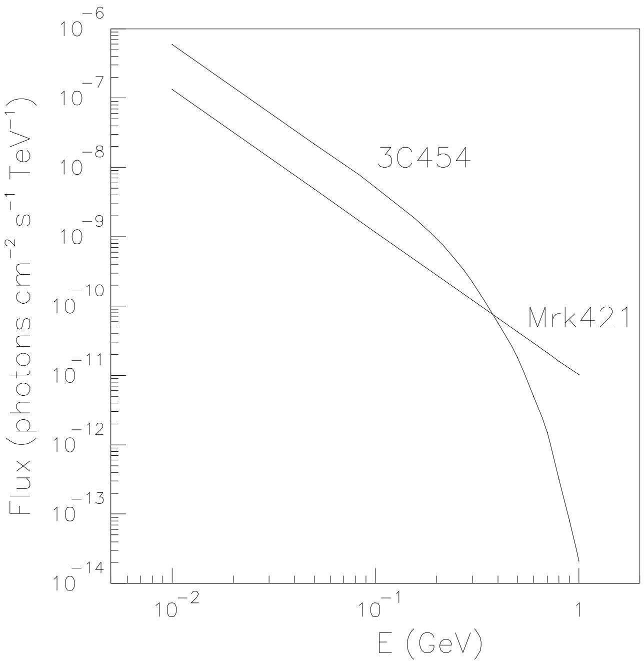


Figura 2.9: *Spettro dei fotoni di Mrk421 e 3C454.*

Infine nella figura 2.10 è mostrata la capacità di ARGO di percepire le variazioni del flusso dei blazar: la frequenza di conteggio dei fotoni è espressa in funzione del tempo di osservazione. Dalla figura si evince che per misurare una variazione del segnale a

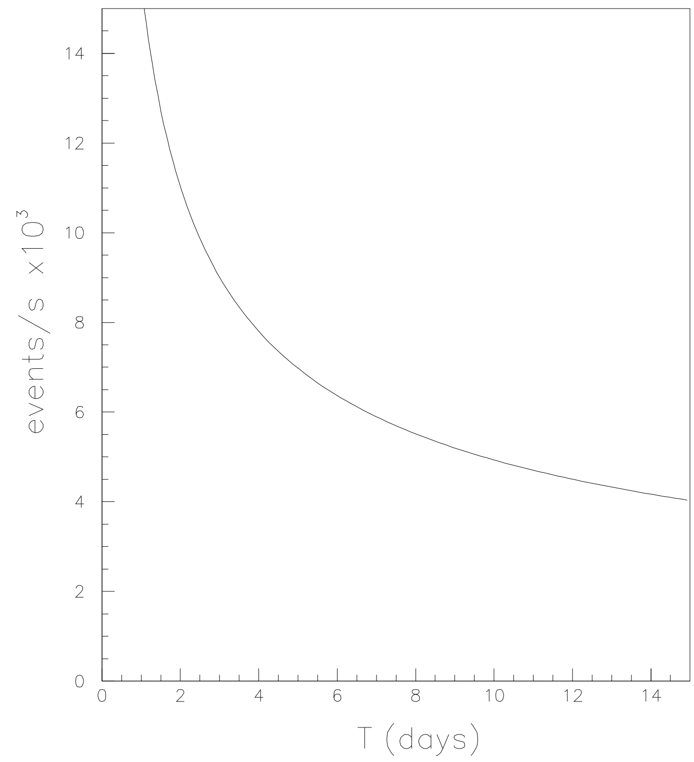


Figura 2.10: *La frequenza di conteggio dei fotoni in funzione del tempo di osservazione per rivelare variazioni del flusso di blazar a 3.5 σ.*

3.5 σ è necessario un aumento del flusso pari a quello della Crab in 5 giorni (2/3 del flusso della Crab in 10 giorni). Questi valori sono comunque inferiori all'aumento del flusso misurato da WHIPPLE tra il 14 e il 15 maggio del 1994; perciò ARGO dovrebbe poter osservare queste variazioni senza particolari problemi.

Anche se la sensibilità di ARGO per sorgenti puntiformi non può in generale competere con quella della nuove generazione di telescopi Cĕrenkov, ARGO avrà il vantaggio di avere una grande copertura angolare del cielo e di essere operativo per lunghi periodi; sarà in grado di effettuare un monitoraggio continuo e sistematico della banda di declinazioni -10° < δ < 70°, osservando sorgenti puntiformi galattiche ed extragalattiche, regioni estese come il piano galattico, SNR e nubi molecolari.

2.2.6 Gamma Ray Burst

Lo studio dei GRB di energia > 10 GeV può essere realizzato con la tecnica di "particella singola", più vantaggiosa nel caso di GRB con E < 50 GeV, o con la tecnica di "bassa molteplicità", più adatta ad osservare GRB di energia più alta.

1) Un rivelatore come ARGO è sensibile a primari di energia $10 \div 100\ GeV$ se opera con la tecnica di "singola particella", cioè registra tutte le particelle secondarie con energia superiore a E_{soglia}. Molti degli eventi sono dovuti a μ ed elettroni di sciami generati da cosmici di bassa energia.

   Un GRB è rivelabile se le particelle secondarie dovute alle interazioni di fotoni con l'atmosfera producono un eccesso di segnale in un breve lasso di tempo che abbia un'ampiezza superiore alle fluttuazioni statistiche del fondo cosmico. Con questa tecnica non si possono misurare né la direzione né l'energia dei primari. L'area effettiva per rivelare un γ di energia E ad un angolo dalla verticale θ è:

   $$A_{eff}(E,\theta) \sim A_d \cdot f_g \cdot n_e(E,\theta)$$

   dove A_d = 5700 m^2 è l'area sensibile, $n_e(E,\theta)$ è il numero medio di particelle cha raggiungono il rivelatore (con energia maggiore di E_{soglia}) e f_g è il fattore di guadagno dovuto alla conversione dei fotoni nello strato di piombo ($f_g \sim$ 1.1).

   Dati un GRB con spettro energetico dN_γ/dE (fotoni per unità di area e di energia) e θ, il numero di eventi rivelati è

   $$N_{SP} = A_d \cdot f_g \cdot cos\theta \int \frac{dN_\gamma}{dE} \cdot n_e(E,\theta) \cdot dE$$

   Il segnale è osservabile se il numero di particelle rivelabili è maggiore delle fluttuazioni statistiche del fondo $N_B = \sqrt{A_d \cdot B \cdot \Delta t}$ dove B è la frequenza di conteggio del fondo (eventi per unità di area e di tempo $\sim$ 1500 eventi $m^{-2}\ s^{-1}$) e Δt è la durata del GRB. Richiedendo che il segnale di GRB sia 4 deviazioni standard maggiore delle fluttuazioni si ottiene che N_{SP} per un GRB della durata di $\Delta t = 1\ s$ deve essere > 1.2 $\cdot 10^4$.

2) La tecnica di "bassa molteplicità" consiste nel rivelare sciami richiedendo che siano colpite almeno sei PAD per ogni sciame. L'area effettiva A_{eff} per rivelare primari γ o protoni usando questo metodo è di 2÷3 ordini di grandezza inferiore a quella per "particella singola" a causa del numero maggiore di particelle richiesto per soddisfare le condizioni di trigger. Inoltre la possibilità di misurare le direzioni di arrivo dei primari ricostruendo il fronte dello sciame riduce il fondo. La risoluzione angolare per primari con $E \sim 10\ GeV$ (angolo di apertura attorno alla sorgente che contiene il 70% del segnale) è r $\sim 5°$ [13]. Usando lo spettro dei protoni misurato da Honda [14], il numero di eventi di fondo con direzione

di arrivo in un cono di raggio r $\sim 5^\circ$ e $\theta = 20^\circ$ risulta essere $B_{LM} \sim 160\ s^{-1}$. Il numero di eventi rivelati da ARGO per i GRB è

$$N_{LM} = 0.7 \cdot \int A_{eff} \cdot \frac{dN_\gamma}{dE} \cdot dE$$

Richiedendo che il segnale sia superiore al fondo di 4 deviazioni standard il numero N_{LM} di eventi di GRB in un tempo $\Delta t = 1\ s$ e $\theta = 20^\circ$ deve essere maggiore di ~ 50.

Assumiamo ora che lo spettro dei fotoni provenienti da un GRB al momento di interagire con l'atmosfera sia $\frac{dN}{dE} = kE^{-\alpha}$ fotoni al m^2 e si estenda senza cambiamenti fino ad un'energia massima $E_{max} > 10\ GeV$. Questa assunzione è supportata dalle misure di EGRET che non ha osservato tagli in energia nello spettro fino alla soglie di sensibilità dello strumento. L'indice spettrale tra 30 MeV e 10 GeV è $\alpha = 1.95 \pm 0.25$ [15].

Per valutare la sensibilità di ARGO studiamo il flusso di energia minimo tra 1 GeV ed E_{max} necessario ad osservare un GRB con ARGO assumendo che lo spettro si estenda fino ad E_{max} senza cambiamenti di pendenza.

Nella figura 2.11 il flusso di energia minimo è funzione dell'energia massima E_{max}, con E_{max} compresa tra 1 GeV e 1 TeV. Le curve sono date per un GRB di durata $\Delta t = 1\ s$ e indice spettrale α = 2.0 con il vincolo che il segnale sia 4 deviazioni standard maggiore delle fluttuazioni del fondo. Osserviamo che la sensibilità aumenta con E_{max} e che la dipendenza è più forte per la tecnica LM piuttosto che per quella SP. Ciò comporta che la tecnica SP sia maggiormente valida per spettri con tagli per valori di E_{max} relativamente bassi, $E_{max} < 50\ GeV$, mentre il metodo LM sia preferibile per spettri più energetici. Adottando entrambi, ARGO potrebbe rivelare GRB con un flusso di energia tra 1 GeV e 1 TeV di $10^{-6} \div 10^{-5}\ erg\ cm^{-2}$, con un indice spettrale $\alpha = 2$. Inoltre possiamo confrontare questo valore con le misure di EGRET estrapolate a 100 GeV (i punti nella figura 2.11) e notare che la maggior parte di queste hanno un flusso di energia superiore ai limiti di osservazione di ARGO.

2.3 Il sole

- *Modulazione dei raggi cosmici.* In tabella 2.3, il confronto con altri rivelatori a terra dedicati allo studio della modulazione dei raggi cosmici mostra il potenziale di ARGO ad investigare variazioni spaziali e temporali per valori di energia parzialmnete esplorati.

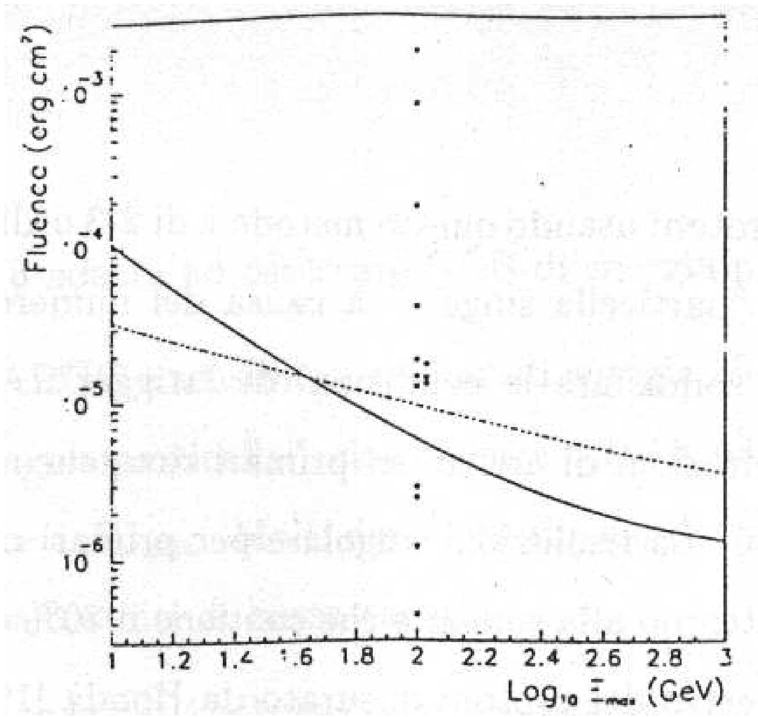


Figura 2.11: *Flusso di energia minimo tra 1 GeV e 1 TeV osservabile con ARGO in funzione dell'energia massima E_{max}, usando la tecnica di "singola particella" (linea tratteggiata) oppure la tecnica di "bassa molteplicità"(linea continua). I punti rappresentano le misure di EGRET estrapolate a 100 GeV.*

La frequenza stimata di eventi rivelati in un cono di apertura di 10 gradi è circa 400 ev/sec. Sarà possibile studiare la modulazione dei raggi cosmici in una direzione asintotica ben definita su scale temporali della frazione di giorno e con una sensibilità a fluttuazioni dell'ampiezza minori dell'1%.

- γ*-flares.* Per calcolare la sensibilità di ARGO nel rivelare flares solari dell'intensità di quelli osservati da EGRET e da GAMMA-1 si è usato un trigger di bassa molteplicità (6÷20 PAD accese). Il risultato non è molto buono a causa dell'elevata pendenza dello spettro (l'indice spettrale γ oscilla tra 3 e 4). Supponendo $\gamma = 3$ il flusso minimo osservabile a 3 σ da un apparato di 3600 m^2 è dato da:

$$J_{\gamma}(E) = 8 \times 10^2 \sqrt{\frac{10}{\Delta T(sec.)}} E_{MeV}^{-3} fotoni \cdot cm^{-2} s^{-1} MeV^{-1} \qquad (2.2)$$

Station	Counter type	Location		Detector characteristics			Total count. rate (c/h)	Minimum primary energy (GeV)	Spread of asympt. directions for each telescope
		Altitude (m)	m.w.e	Area (m^2)	N. of telescope	Angular resol.			
Mawson	P.C.	s.l.	30	8	>6	30	3.510^5	50	40 -90
Embudo	Sc.	2600	27	4	5	30-45	3.310^5	40	40 -90
Socorro	Sc	1500	74	4	4	30-45	710^4	100	40 -90
Misato	Sc.	s.l.	34	36	10	20-40	1.410^6	50	40 -90
Sakashita	Sc.	300	80	36	10	20-40	$5 \cdot 10^5$	100	40 -90
Matsushiro	Sc.		220	25	16	20-40	10^5	300	40 -90
Nagoya	Sc.	s.l.		36	16	20-40	10^7	10	60 -120
Moscow	μ Hodosc.	s.l.		9	-	1-2	$3.6 \cdot 10^6$	9	20 -60
Milagro	Cerenkov	2500		5000	-				
Argo 3600	RPC	4300		3600	-	<5	10^7	$10^{(*)}$	15 -35
Argo 14400	RPC	4300		$\sim 1.5 \cdot 10^4$	-	<4	$3 \cdot 10^7$	$10^{(*)}$	15 -35
$(*)$ with the estimate of the individual energies									

Tabella 2.3: *Esperimenti per lo studio della modulazione dei raggi cosmici.*

con ΔT tempo di durata del segnale. La sensibilità di ARGO (5700 m^2) si ottiene scalando il flusso di un fattore 1.6.

- *Monitoraggio dell'IMF.* La prima osservazione diretta degli effetti del campo magnetico sull'ombra prodotta dal sole sui raggi cosmici è stata fatta dal rivelatore AS-γ, in Tibet; tuttavia, a causa dell'alta energia di soglia, i dati sono stati raccolti su lunghi periodi. ARGO avrà il vantaggio di osservare l'ombra del sole ad energie di 1 TeV con alta risoluzione angolare; ci si aspetta, quindi, di rivelare un ombra ben definita in tempi relativamente corti.

  Un osservazione corrispondente a circa 10$\div$15 giorni di presa dati estiva, dovrebbe essere sufficiente a rivelare l'ombra entro 4$\div$5 σ. Per definire la posizione dello spostamento, è necessaria un analisi dettagliata della forma dell'ombra. Una stima rozza permette di dire che ARGO-3600 potrà monitorare la posizione del sole con un sensibilità del 20$\%$ alle variazioni della struttura su larga scala del campo magnetico solare ed interplanetario con tempi di osservazione di due settimane o meno.

2.4 Misura del rapporto $\bar{p}/p$ ad energie del TeV

Le prime osservazioni sull'ombra della luna sono state fatte da CYGNUS, CASA, EAS-TOP, HEGRA e AS-γ; la migliore determinazione viene dall'esperimento AS-γ (10 TeV di energia di soglia). ARGO avrà il vantaggio cruciale di *i)* un'energia di soglia più bassa, *ii)* la possibilità di selezionare l'energia del primario e *iii)* una risoluzione angolare migliore. Ad energie al di sotto di pochi TeV, l'ombra creata da protoni ed antiprotoni è aspettata sufficientemente risolta da permettere una misura indiscutibile del rapporto $\bar{p}/p$.

Per dare una stima della sensibilità di ARGO a questo tipo di fisica, il flusso di antiprotoni, come predetto da Stecker e Wolfendale, dovrebbe essere rivelato da ARGO-3600 con una sensibilità di 3.5 σ in 3 anni di presa dati; in caso di assenza di segnale, il limite superiore al 90$\%$ C.L. fissato da ARGO-3600 è di 1.6 $\cdot 10^{-2}$ (vedi figura 2.12) (i valori per ARGO vanno scalati di un fattore 1.6). Poiché la stima teorica del rapporto $\bar{p}/p$ per il modello di universo a simmetria barionica è molto al di sopra di questo limite, mentre per il modello di produzione galattica degli antiprotoni è molto al di sotto, ARGO sarà in grado di scartare definitivamente una delle due ipotesi.

Misure di $\bar{p}$ nella regione del TeV da parte di esperimenti su satellite o su palloni atmosferici sono praticamente impossibili a causa del basso flusso di $\bar{p}$ e dell'insufficiente campo magnetico utile per l'identificazione della carica delle particelle. Un esperimento come ARGO pone rimedio a questi problemi grazie alla sua ampia superficie attiva e facendo uso del campo magnetico terrestre e dell'ombra della luna. Il flusso dei raggi cosmici infatti viene assorbito dalla luna e si osserva una zona di diminuzione del flusso in direzione della sua posizione in cielo. Questa regione risulta in realtà legger-

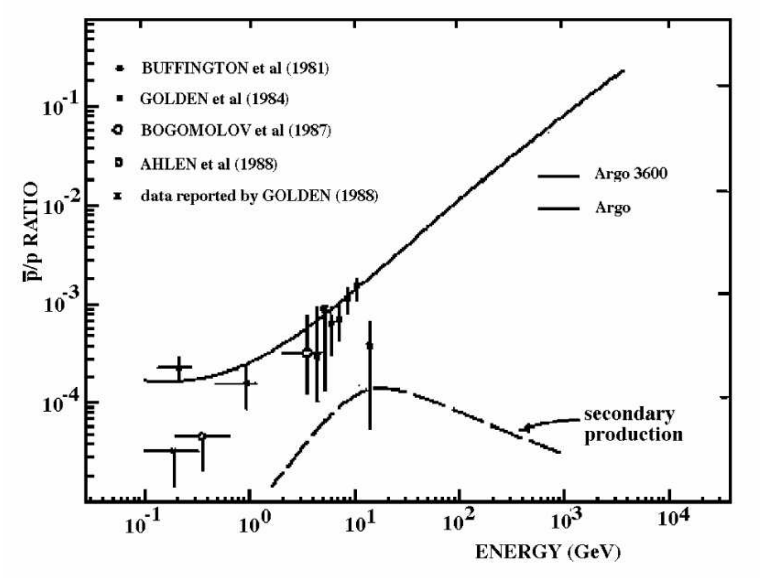


Figura 2.12: *Limite superiore al 90 % C.L. sul rapporto $\bar{p}/p$ fissato da ARGO(14400 m^2) e ARGO-3600 in caso di assenza di segnale.*

mente spostata a causa dell'effetto del campo magnetico terrestre che agisce in modo diverso su particelle di carica opposta. Con una buona risoluzione angolare è possibile ottenere la separazione delle due regioni di assorbimento e quindi si può calcolare il flusso degli antiprotoni.

2.5 Spettro dei protoni ad energie $10 \div 200$ TeV

EAS indotti da protoni primari con energia E > 5 TeV possono essere pienamente rivelati da ARGO; è aspettata una forte correlazione tra l'energia del primario e la dimensione delllo sciame, cioè ci si aspetta una sostanziale correlazione tra l'energia dei protoni e il numero di PAD colpite. Questo aspetto è stato investigato come segue.

1. sono stati simulati sciami con il core distribuito su un area di 100 m^2 centrato sul rivelatore. La loro distribuzione di energia è stata campionata in base alle curve (1) e (2) della figura 2.13 da $E_{min} = 5\,TeV$ a $E_{max} = 400\,TeV$.

2. per ciascun evento è stato contato il numero di strisce colpite ad intervalli di

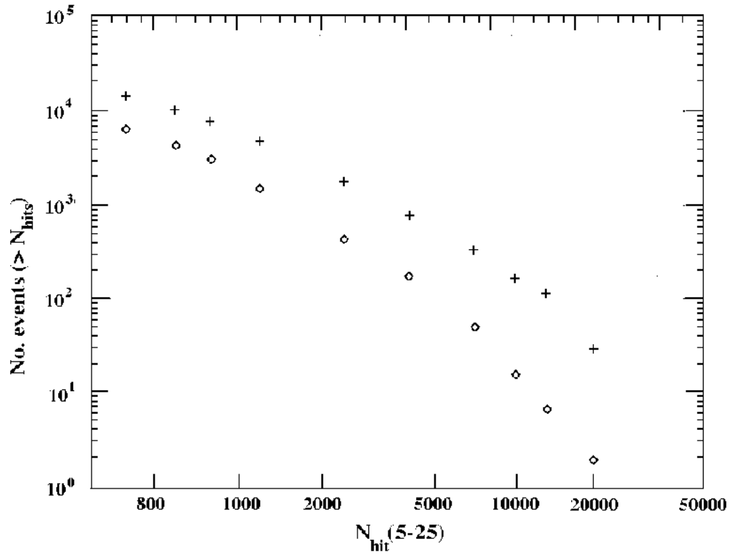


Figura 2.13: *Distribuzione integrale di frequenza degli eventi in funzione del numero di strisce accese ad una distanza di 5 $\div$ 25 m dal core dello sciame. Le due distribuzioni, superiore ed inferiore, rappresentano rispettivamente le curve (2) e (1) della figura 1.7.*

$\Delta R = 5 \div 25\ m$ dal core dello sciame. La determinazione del core per questo tipo di eventi è migliore di 1 m.

3. la distribuzione integrale di figura 2.13 riporta il numero di eventi con una molteplicità di strip > N_h per entrambe le curve (1) e (2). Un effetto di soglia è visto al di sotto di $N_h \simeq 1000$; inoltre sciami con energie minori di 20 TeV non contribuiscono ad eventi con N_h > 1000. La distribuzione della frequenza per valori $\Delta N_h = 10^3 \div 10^4$ è appropriata a rappresentare lo spettro dei protoni da un energia di 20 TeV fino a circa 200 TeV.

Da questi risultati appare chiaro che la misura di frequenza di eventi come funzione della molteplicità di strisce fornisce un potente strumento per investigare sia il flusso assoluto che la distribuzione in energia dei protoni primari da circa $10 \div 20\ TeV$ fino ad almeno 200 TeV; l'esperimento ARGO potrà ottenere la massima efficienza ad energie del protone > 5 TeV, in modo da ottenere una misura non discutibile della componente elettromagnetica degli sciami atmosferici indotti da protoni con queste energie.

Capitolo 3

RPC (Resistive Plate Counter)

3.1 Descrizione dei rivelatori RPC

Gli RPC sono rivelatori operanti in regime continuo, il cui elemento sensibile è uno spessore di gas a pressione atmosferica [1] posto all'interno di un campo elettrico uniforme (tipicamente dell'ordine di $4 \div 4.5\ kV/mm$) generato da due elettrodi piani paralleli.

Gli elettrodi sono costituiti da due lastre di resina fenolica (bakelite) spesse pochi mm, con costante dielettrica $\varepsilon \simeq 6\ \varepsilon_0$ e resistività molto elevata, dell'ordine di $5 \cdot 10^{11}\ \Omega\ cm$. Sulla superficie interna delle lastre di bakelite è applicato uno strato sottile di olio di lino, così che eventuali imperfezioni presenti su queste superfici siano livellate. La presenza di eventuali punte può infatti dare luogo a scariche spurie nel rivelatore, rendendolo così rumoroso. La superficie esterna delle lastre di bakelite è verniciata con una soluzione a base di grafite; questa serve per connettere tutta la superficie della lastra con il generatore di alta tensione e garantire così una distribuzione uniforme della differenza di potenziale applicata. La scelta di utilizzare un materiale come la grafite, con un valore elevato della resistenza superficiale pari a circa 200 $k\Omega/\Box$, invece di una connessione metallica, è dettata dalla necessità di dover raccogliere la carica indotta su degli elettrodi esterni al rivelatore: i materiale resistivi infatti, a differenza di quelli conduttori, sono trasparenti ai segnali di alta frequenza.

La scelta, invece, di utilizzare elettrodi di bakelite è dettata dalla necessità di ridurre il tempo morto del rivelatore al minimo. Infatti, se gli elettrodi fossero conduttori, un rivelatore realizzato in questo modo si comporterebbe come un condensatore piano e la sua scarica, in seguito alla formazione di una valanga nel gas, interesserebbe tutta la superficie. L'intero rivelatore, in questo caso, avrebbe un tempo morto pari a CR, dovuto alla scarica del condensatore, con C pari alla capacità del condensatore ed R corrispondente alla resistenza interna del generatore di alta tensione. L'impiego di

[1] In realtà la pressione di lavoro di un RPC risulta essere leggermente maggiore di quella atmosferica per permettere il ricambio del gas all'interno della camera.

elettrodi resistivi consente, invece, di considerare il rivelatore come composto da tanti condensatori di piccola superficie, indipendenti tra loro in quanto connessi da resistenze molto elevate. Una stima approssimata delle dimensioni della superficie di ciascuno di questi piccoli condensatori si ottiene dalla seguente relazione: $S = \frac{Ql}{V\varepsilon_0}$. Assumendo che la carica Q raccolta sugli elettrodi esterni sia pari a 500 pC qualora sia applicata una tensione $V = 10000\ Volt$ ai capi di uno spessore di gas $l \simeq 2\ mm$, si ha: $S \simeq 0.11\ cm^2$.

Se d è lo spessore dell'elettrodo, per esempio uguale a 2 mm, il tempo morto CR del rivelatore risulta essere pari a:

$$CR = \frac{\varepsilon S}{l}\frac{\rho d}{S} = \varepsilon\rho \simeq 250\ ms.$$

Il tempo morto riguarda solo una regione limitata del rivelatore: quella realmente interessata dalla scarica. Per limitarne l'estensione, ed ottenere quindi una localizzazione della ionizzazione, si utilizza una miscela composta da argon 15%, tetrafluoretano $C_2H_2F_4$ 75%, e iso-butano C_4H_{10} 10%. L'argon può essere considerato la parte attiva della miscela perché favorisce la ionizzazione del gas al passaggio della particella, mentre l'iso-butano ha la caratteristica di avere un elevato coefficiente di assorbimento della luce ultravioletta; anche il freon contribuisce all'estinzione della scarica, infatti, essendo un gas fortemente elettronegativo, tende a sottrarre elettroni alla scarica stessa formando con essi ioni negativi. Quando lo strato di gas è attraversato da una particella ionizzante si innesca una scarica elettrica provocata, come si vedrà meglio nel successivo paragrafo, dagli elettroni liberati durante il processo. La durata e la diffusione di questa scarica sono limitate dai seguenti meccanismi:

- un elevato valore della resistività degli elettrodi, che si è già visto contribuire ad abbassare il valore del campo elettrico nella regione vicina a quella in cui si è verificato il fenomeno della ionizzazione;

- l'assorbimento dei fotoni ultravioletti da parte dell'iso-butano, che impedisce il formarsi di scariche secondarie delocalizzate a causa della fotoionizzazione del gas;

- l'elevato valore dell'affinità elettronica del tetrafluoretano, che fa sì che questo gas contribuisca alla cattura degli elettroni più esterni della scarica riducendone le dimensioni, in particolare quelle nella direzione trasversale all'asse della scarica stessa.

Tutti questi fenomeni contribuiscono a ridurre la durata temporale di una scarica a circa 10 ns.

L'elevata differenza temporale tra il tempo morto di una "celletta" del rivelatore interessata dall'evento (pari a circa 250 ms) e la durata di una scarica (pari a circa 10 ns), fa sì che durante la scarica i piatti degli elettrodi si comportino effettivamente come se fossero realizzati con un materiale isolante.

3.2 Il meccanismo di “streamer”

Nel paragrafo precedente si è accennato al processo di ionizzazione che avviene all’interno della miscela di gas al passaggio di una particella carica ed ai diversi gas costituenti la miscela: argon (componente attiva della miscela), iso-butano (necessario per assorbire i fotoni ultravioletti) e tetrafluoretano (gas fortemente elettronegativo). In questo paragrafo si cercherà di spiegare in modo più approfondito il fenomeno che porta alla formazione del segnale in seguito al passaggio di una particella ionizzante.

Quando una particella carica attraversa lo spessore di gas, come conseguenza della ionizzazione si formano un certo numero di coppie elettrone-ione che, in presenza di un campo elettrico, si muovono rispettivamente verso l’anodo e verso il catodo. Gli elettroni sufficientemente energetici, a loro volta, ionizzano altri atomi dando luogo al fenomeno che prende il nome di moltiplicazione a valanga. Durante il processo di formazione della valanga, gli ioni si possono considerare fermi essendo la loro velocità di deriva molto inferiore rispetto a quella degli elettroni. Gli elettroni si dirigono verso l’anodo e lasciano dietro di sé una zona di gas carico positivamente. Si creano così due zone di carica: una negativa (elettronica) alla testa della valanga e una positiva (ionica) alla coda. Lungo l’asse della valanga, al fronte e alla coda di essa, a causa di queste due zone cariche si forma un campo elettrico E che ha lo stesso valore di quello E_0 (compreso tra 3.5 e 4.5 kV/mm a seconda delle proporzioni dei tre gas nella miscela) applicato al gas nella zona esterna (sugli elettrodi), ma verso contrario. Tra la testa e la coda della valanga il campo effettivo è minore di quello applicato, mentre tra la testa e l’anodo e tra la coda e il catodo i due campi si sommano e formano un campo più intenso di quello originario. Con l’aumentare delle cariche prodotte durante il processo di formazione della valanga aumenta anche il valore del controcampo E interno alla valanga. Quando l’intensità di questo campo diviene paragonabile a quella del campo generato dagli elettrodi, all’interno della valanga si ottiene un campo praticamente nullo. In queste condizioni si ha la ricombinazione delle coppie elettrone-ione. Ne risulta una emissione isotropa di fotoni aventi energia nella regione dell’ultravioletto. I fotoni che non vengono riassorbiti all’interno della valanga possono così ionizzare atomi di gas al di fuori di questa e formare in questo modo nuove valanghe (vedi figura 3.1).

Queste nuove valanghe raggiungono a loro volta la condizione di annullamento del campo al loro interno e portano al ripetersi del processo. Essendo il campo elettrico diretto verso le estremità della valanga primaria, le valanghe prodotte per fotoionizzazione si sviluppano in questa direzione concatenandosi tra di loro a formare lo $streamer$. La propagazione di questa catena di valanghe avviene, dunque, sia in direzione dell’anodo che in quella del catodo. Quando le due estremità della valanga raggiungono gli elettrodi, la differenza di potenziale applicata al gas si annulla. Nel caso invece di elettrodi resistivi, il campo elettrico si sposta ai capi della bakelite interrompendo il passaggio di corrente.

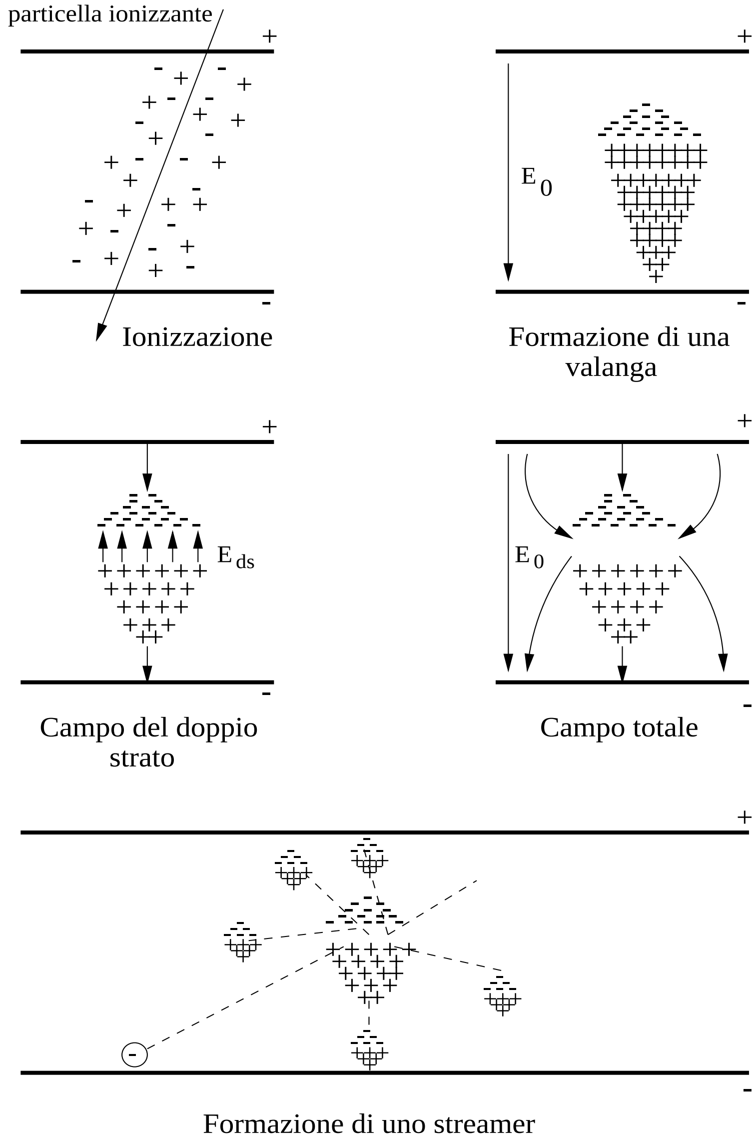


Figura 3.1: Rappresentazione schematica del fenomeno dello *streamer*.

L’innescarsi delle valanghe secondarie avviene in un tempo molto breve, grazie all’innalzamento del campo elettrico locale e, quindi, si ha una variazione di carica molto rapida che induce un segnale veloce sulle strisce di lettura. Il tempo di salita di questo segnale è di $1 \div 3\ ns$. Il tempo di discesa del segnale dipende, invece, dal tempo di raccolta degli elettroni e diminuisce al crescere della percentuale di tetrafluoretano contenuto nella miscela. La fluttuazione del tempo necessario per innescare il processo di streamer incide sulla risoluzione temporale del RPC che è di circa 1 ns [16] e migliora all’aumentare della tensione applicata [2].

Assumendo che la transizione da valanga a streamer si abbia quando il campo di carica spaziale eguaglia il campo esterno applicato al gas, si può stabilire la condizione che deve essere soddisfatta affinché si abbia la formazione dello streamer. Ciò accade quando il numero di elettroni generati nella valanga è dell’ordine di $5 \cdot 10^8$. Questa condizione è nota come criterio di Meek.

3.2.1 Formazione del segnale di un RPC

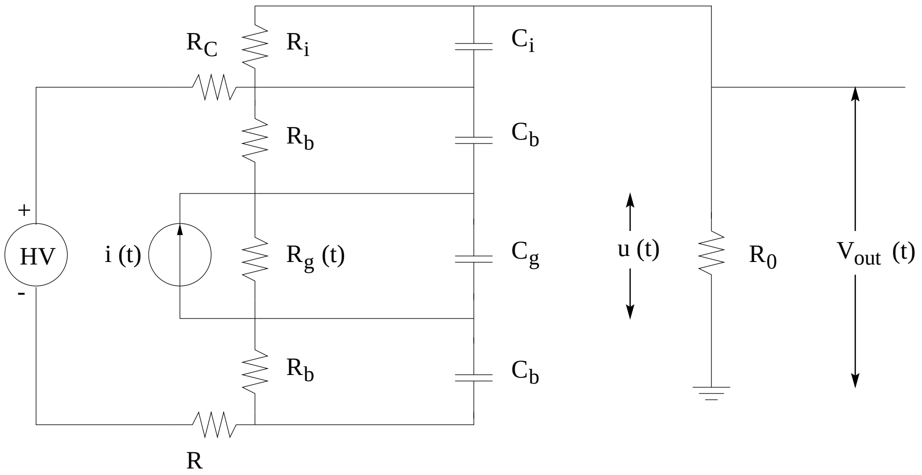
Nell’ipotesi che il campo elettrico applicato al gas sia costante e omogeneo e che la mobilità delle cariche sia anch’essa una costante, il segnale di corrente indotto sugli elettrodi dalla formazione dello streamer dovrebbe avere una forma triangolare. Esso dovrebbe infatti salire in un tempo molto breve, dell’ordine di 3 ns, corrispondente al tempo di formazione di uno streamer da una valanga e decrescere, successivamente, in modo lineare a causa della raccolta degli elettroni sull’anodo. In realtà il campo elettrico non rimane costante e omogeno e la mobilità delle cariche poi, a causa della elevata ionizzazione del gas e della presenza di un gas elettronegativo nella miscela, non rimane costante. Si assume, allora, che il segnale di corrente si possa descrivere tramite un esponenziale nel modo seguente:

$$i_g(t) \simeq \frac{q}{\tau_g} e^{t/\tau_g}$$

con τ_g pari al tempo di raccolta della carica q sull’anodo (pari a circa 10 ns). Per rappresentare la formazione di questo segnale nel RPC è stato utilizzato il circuito equivalente mostrato nella figura 3.2 nel quale il generatore di corrente eroga una

$$i(t) = q\delta(t).$$

[2] I rivelatori più usati per esperimenti di fisica che richiedono una buona risoluzione temporale sono i contatori a scintillazione, con i quali si può ottenere una risoluzione di qualche centinaio di picosecondi; questo valore, però, peggiora molto rapidamente all’aumentare delle dimensioni. Dovendo costruire uno strumento che occupa un’area molto vasta si è preferito quindi l’utilizzo degli RPC perché sono molto meno costosi oltre che più efficienti su larga scala.



C_g è la capacità della "celletta" elementare della spaziatura di gas: $C_g = \frac{\epsilon S}{l} \simeq 0.05\, pF$.
$R_g(t)$ è la resistenza del gas qualora sia fortemente ionizzato durante la scarica.
τ_g è la costante di tempo di estinzione della scarica, ossia il tempo necessario affinché gli elettroni siano raccolti sull'anodo: $\tau_g = R_g C_g \simeq 20\ ns$, per cui $R_g \simeq 400\ K\Omega$.
C_b è la capacità della "celletta" elementare della lastra di bakelite: $C_b = \frac{\epsilon S}{d} \simeq 0.3\, pF$.
R_b è la resistenza della "celletta" elementare della lastra di bakelite: $R_b = \frac{\rho d}{S} \simeq 850\ G\Omega$.
τ_b è la costante di tempo di scarica dell'elettrodo resistivo, quella che determina il tempo morto della "celletta" elementare: $\tau_b = R_b C_b = \rho\epsilon \simeq 250\ ms$.
R_c è la resistenza dovuta alla conducibilità superficiale della grafite e $R_c \simeq 200\ k\Omega/\Box$.
R_i è la resistenza dello strato di isolante tra il piano grafitato e l'elettrodo di lettura.
C_i è la capacità dell'elettrodo rispetto al piano grafitato.
R_0 è l'impedenza caratteristica della linea di trasmissione costituita dall'elettrodo di lettura e dal piano di massa delle strisce stesse: $R_0 \simeq 50\ \Omega$.

Figura 3.2: Circuito equivalente di un RPC.

Questo segnale è integrato da una capacità C_g che è quella di una celletta elementare di gas e da una resistenza $R_g(t)$, che rappresenta la resistenza del gas e dipende quindi sia dalla mobilità delle cariche che dalla ionizzazione e dal campo effettivamente applicato al gas durante la scarica. Con questa schematizzazione il potenziale ai capi del gas è pari a:

$$u(t) = \frac{q}{C_g} e^{-t/\tau_g}.$$

Questo segnale è letto ai capi di una resistenza R_0 che rappresenta l'impedenza della linea di lettura. Poiché le costanti di tempo dei circuiti derivatori interposti tra il gas e la linea di lettura sono maggiori di τ_g, il segnale non è derivato e, trascurando la partizione di tensione su R_c, ai capi della resistenza R_0 si raccoglie il segnale:

$$V_{out} \simeq \frac{R_0}{2(R_0 + R_g)} u(t) \simeq \frac{qR_0}{2\tau_g} e^{-t/\tau_g}$$

in cui il fattore $1/2$ tiene conto, anche se in modo approssimativo, della partizione del segnale tra i due elettrodi di bakelite. Assumendo che la carica q, per semplificare i conti, corrisponda a circa 10^9 elettroni, ossia che $q \simeq 160\ pC$, il massimo valore che può essere raggiunto da V_{out} è dell'ordine di $V_{out}^{MAX} \simeq 200\ mV$.

3.3 Gli RPC di ARGO

Poiché l'esperimento ARGO si trova a 4300 m sul livello del mare, la presenza di area rarefatta comporta una pressione di lavoro degli RPC pari a 0.6 atm; la miscela utilizzata è composta da Argon 15%, Tetrafluoretano (R134A) 75%, e Iso-butano 10% [3].

Gli RPC dell'esperimento sono rivelatori di dimensioni $280 \times 125\ cm^2$. Ciascun RPC è collocato in un contenitore $282 \times 128 \times 5\ cm^3$ che racchiude il rivelatore RPC vero e proprio, le superfici di pick-up e l'elettronica di front-end.

Gli elettrodi sono costituiti da due lastre di bakelite, spesse 2 mm, tra le quali sono stati inseriti dei dischetti di materiale isolante (PVC), con una superficie pari a circa 1 cm^2 e disposti a 10 cm l'uno dall'altro, per garantire la rigidità del rivelatore e l'uniformità della spaziatura tra gli elettrodi (vedi figura 3.3).

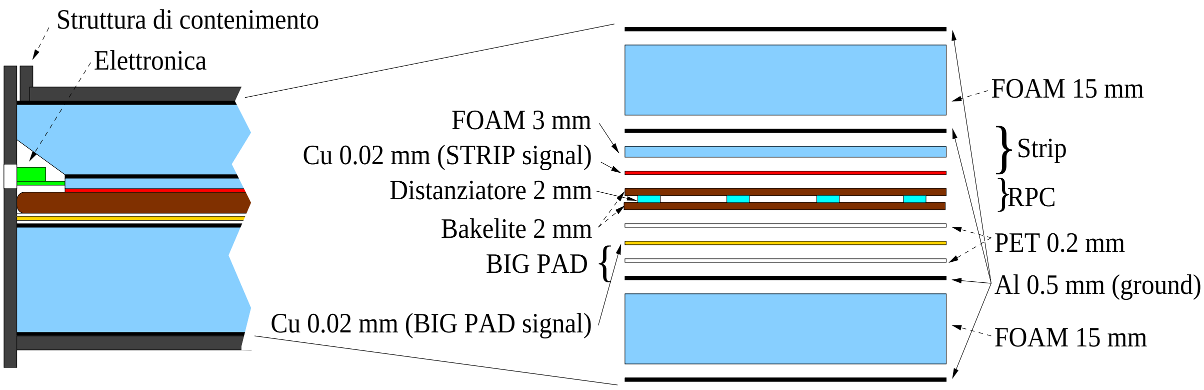


Figura 3.3: *Sezione verticale del rivelatore*

[3]In queste condizioni la ionizzazione specifica primaria (cioè il numero medio di coppie di ioni prodotte per unità di percorso dalla particella primaria) risulta essere pari a 6.1 $coppie/mm$.

Al di sotto della camera (figg. 3.3 e 3.4) si trovano due grossi elettrodi di lettura del segnale, le *BIG PAD*, che coprono l'intera superficie del rivelatore, essendo costituite da un foglio di rame di dimensioni $140 \times 125\ cm^2$. Il piano di lettura della BIG PAD è incollato ad un sottile foglio di materiale isolante (PET), spesso $200\ \mu m$, rivolto verso la massa fornita dalla struttura di contenimento del RPC. Un altro foglio di PET dello stesso spessore isola, poi, il piano di lettura della BIG PAD dal piano grafitato inferiore del RPC.

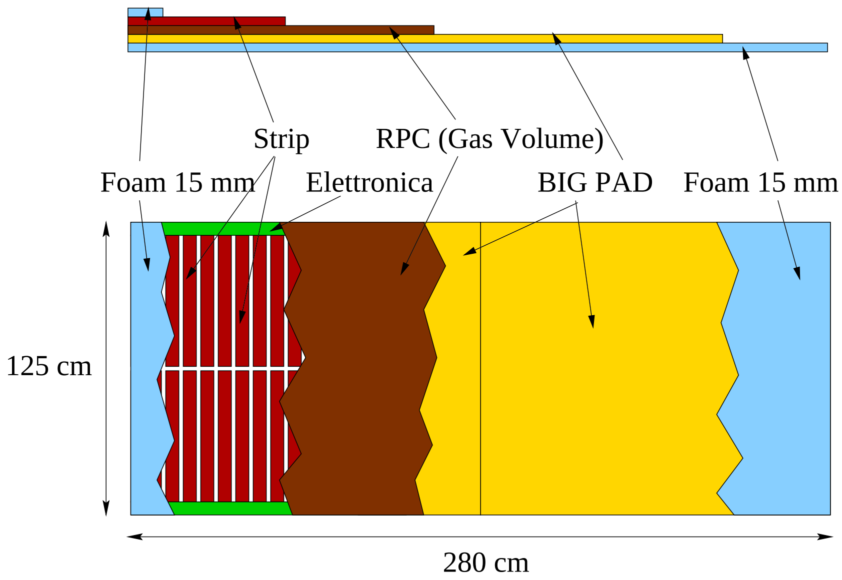


Figura 3.4: *Sezione travesrale, vista di lato e dall'alto, del rivelatore*

Al di sopra della camera si trovano invece le strisce di lettura collegate all'elettronica di front-end. Gli elettrodi di lettura sono in rame e sono segmentati in strisce lunghe 62 cm e larghe 6.7 cm, poste a circa 3 mm una dall'altra. Il numero totale di strisce per ciascun RPC è pari a 80; la lettura di queste, tuttavia, come si vedrà nel seguito, viene fatta ad opera di dieci diverse schede di elettronica poste sul rivelatore, ciascuna delle quali acquisisce i segnali provenienti da 8 strisce. Il piano di massa delle strisce è realizzato con un sottile foglio di alluminio ed è separato dal piano delle strisce da uno strato di materiale plastico polistirene spesso 3 mm. La costante dielettrica e lo spessore di questo isolante sono scelti in modo da realizzare una linea di trasmissione con un'impedenza caratteristica di 11 Ω e una velocità di trasmissione di circa $2 \cdot 10^8\ m/s$.

3.3.1 Elettronica di *front-end*

La lettura di un RPC consiste nell'acquisizione dei segnali indotti sulle strisce dal passaggio di una particella carica. Le strisce sono organizzate in unità logiche chiamate PAD, le cui dimensioni sono $56 \times 62\ cm^2$ (vi sono 10 PAD per ogni RPC). Ogni PAD è composta da 8 strisce (vedi figura 3.5) ed è equipaggiata con una scheda di elettronica di front-end (FEC) avente la stessa larghezza: la scheda ha dimensioni tali che ognuno dei suoi 8 ingressi è in contatto con una striscia, rendendo non necessari i cavetti di collegamento.

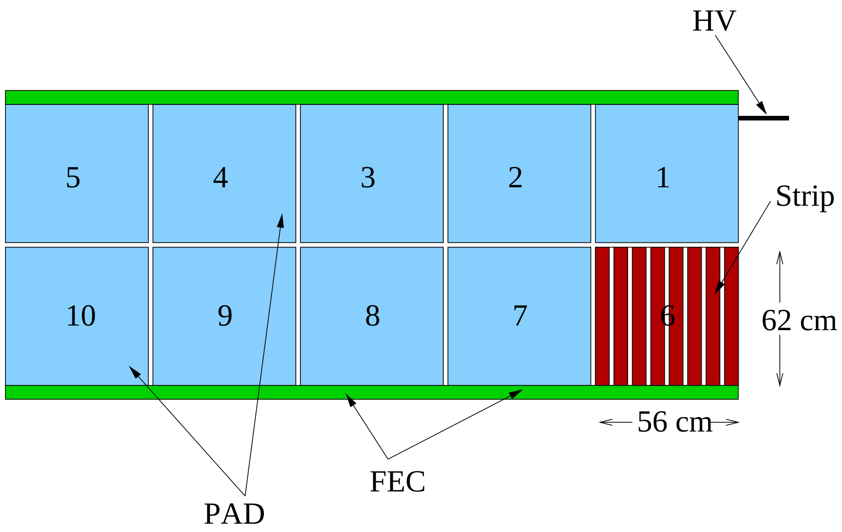


Figura 3.5: *Disegno schematico della suddivisione del RPC in PAD.*

La FEC è basata su un chip discriminatore a 8 canali, ciascuno dei quali consiste di un amplificatore di tensione connesso ad un comparatore a soglia variabile. All'arrivo del primo segnale di streamer, in uscita dalla FEC, si ha un segnale logico ECL per ogni striscia la cui durata è di pochi ns. Questi segnali vengono poi inviati alle Local Station dove vengono raccolte e gestite le informazioni provenienti dal singolo CLUSTER.

Capitolo 4

Il sistema di test degli RPC di ARGO

In questo capitolo verrà descritto il sistema di test usato per certificare i primi esemplari di rivelatori prodotti dalla fabbrica. Questi test sono molto importanti, in primo luogo perché servono per controllare che gli esemplari definitivi degli RPC rispettino le specifiche tecniche richieste, e quindi che non siano presenti errori di costruzione e di montaggio; in secondo luogo servono per capire il funzionamento dei rivelatori, cioè per controllare che parametri tipici di un rivelatore, quali risoluzione temporale ed efficienza, siano quelli previsti per l'esperimento.

L'idea su cui si basa il sistema di test è quella di costruire un sistema semplice ed economico che permetta di effettuare tutte le misure necessarie. È stato deciso di utilizzare normali strumenti di laboratorio in grado di essere controllati in maniera remota, come per esempio un oscilloscopio, in modo da poter gestire tutto il sistema con un semplice computer dotato delle opportune schede di interfaccia. Gli strumenti utilizzati e i parametri richiesti sono descritti in seguito.

Per creare il sistema di test si è scelto di utilizzare il linguaggio di programmazione *Labview* [1] in modo da poter ottenere un sistema completamente automatizzato, permettendo quindi una permanenza minima nel sito di test. Sono stati creati una serie di programmi per il controllo tramite computer degli strumenti di laboratorio necessari; questi programmi sono stati successivamente fusi insieme per ottenere il sistema di test degli RPC.

A causa dell'impossibilità di riportare su carta, in maniera chiara, i vari programmi scritti con Labview, di seguito verrà spiegato il loro funzionamento riportando solo qualche diagramma significativo; una descrizione più dettagliata è riportata in appendice A.

[1] *Labview* è un linguaggio di programmazione grafico molto utilizzato in campo industriale che, pur non richiedendo alcuna conoscenza di linguaggi di programmazione tradizionali, permette di gestire, tramite computer, parecchi tipi di apparecchiature collegabili ad un PC.

4.1 Il controllo del RPC

La procedura di accensione di un RPC, primo passo per una qualsiasi misura, non è semplice come si può pensare, specialmente se la camera non è mai stata accesa prima. Infatti all'interno del "gas volume" potrebbero essere presenti delle impurità che, nel caso di errata accensione, potrebbero generare scariche elettriche in grado di rovinare irrimediabilmente il rivelatore. Per questo motivo la camera viene alimentata con una tensione via via maggiore, aumentata gradualmente secondo tempi prefissati in modo che vi sia il tempo di bruciare le eventuali impurità mediante piccole scariche che si innescano a causa della loro presenza. I resti di queste impurità vengono poi trascinati via dal gas che scorre all'interno della camera.

È inoltre molto importante tenere sotto continuo controllo la corrente che scorre all'interno del rivelatore, in quanto un valore troppo elevato potrebbe rovinare l'RPC.

È stato quindi elaborato un programma in grado di gestire l'alimentatore di alta tensione CAEN N570 mediante la scheda per computer CAEN A303. Questi due oggetti sono connessi da un cavo coassiale e comunicano tra loro mediante un protocollo di trasmissione seriale della CAEN, chiamato "High Speed CAENET", in cui i dati vengono trasferiti sotto forma di numeri esadecimali.

4.1.1 L'alimentatore di alta tensione CAEN N570

In figura 4.1 è mostrato il programma che, basandosi su alcune librerie fornite dalla CAEN, permette la comunicazione tra il computer e l'alimentatore.

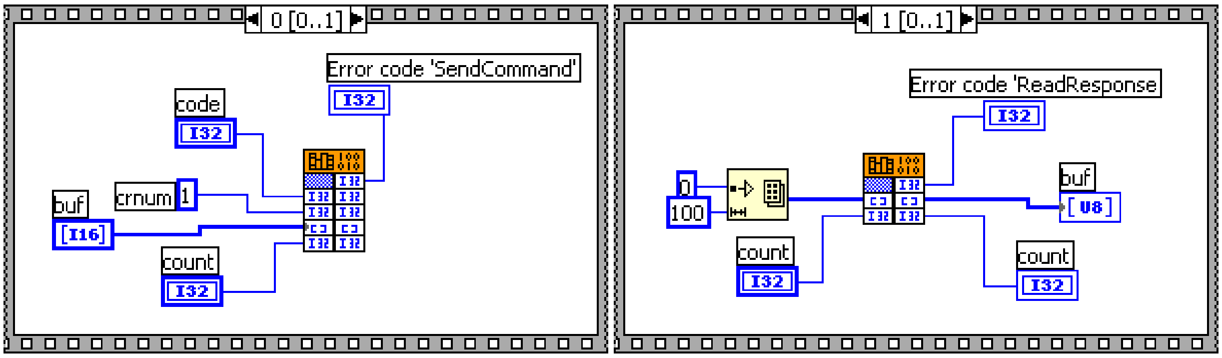


Figura 4.1: *Schema del programma "Send Command".*

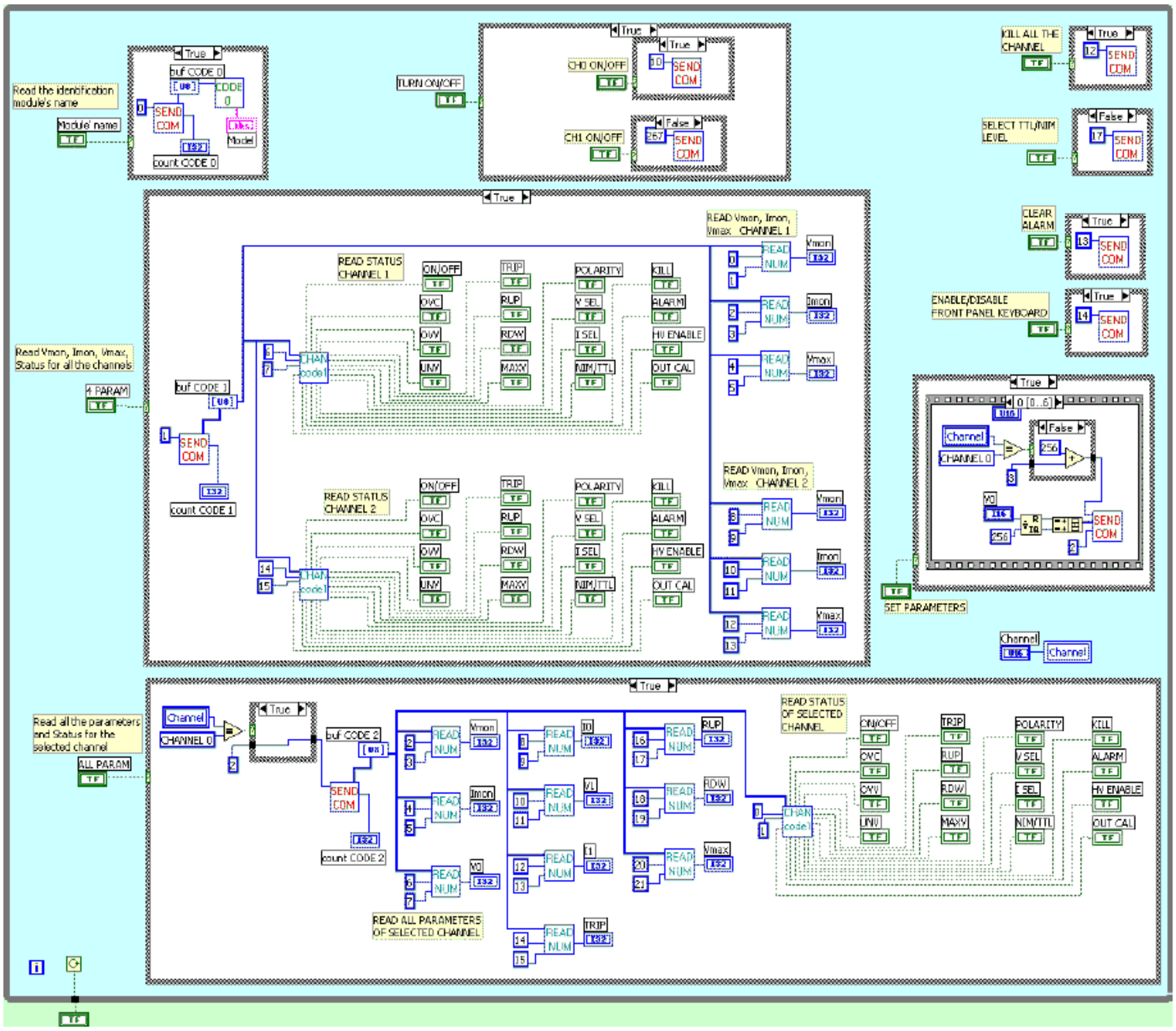


Figura 4.2: *Schema del pannelo di controllo dell'alimentatore CAEN N570.*

Il primo passo consiste nell'inviare ad una periferica specificata dal "crate number" (in questo caso l'N570 si trova sul numero 1) un codice corrispondente al comando desiderato, che in alcuni casi richiede altri due parametri (ad esempio se si vuole impostare una tensione, bisogna mandare, oltre al codice, anche il valore della tensione): il numero da inviare "buffer" e il numero di cifre esadecimali da cui è costuito "count" (si ricordi che i numeri vengono inviati in formato esadecimale). Il secondo passo consiste nel leggere la risposta dell'alimentatore e inserirla in una matrice di numeri "buffer" di "count" cifre esadecimali.

Come si vede dalla figura 4.2 il pannello di controllo dell'alimentatore non fa altro che usare questo programma, e, in base al comando effettuato, elaborare l'eventuale risposta. Ad esempio se si vuole conoscere lo status dei canali si invia il codice "1", e in risposta si ha una matrice i cui primi due elementi rappresentano la tensione effettiva generata dal primo canale dell'alimentatore ("V_{mon}"), il terzo e il quarto elemento danno la corrente che scorre nel primo canale ("I_{mon}"), e così via. Unica differenza nella lettura di questa matrice si ha per quei parametri che possono essere rappresentati con livelli logici (per esempio se un canale è acceso o spento, se sta salendo in tensione o scendendo, ecc.): in questo caso ad ognuno degli 8 bit corrispondenti alle due cifre esadecimali della matrice vengono associati 8 di questi parametri.

In questo modo è possibile compiere qualsiasi operazione sull'alimentatore conoscendo soltanto il codice corrispondente (disponibile sul manuale d'uso dello strumento).

4.2 L' acquisizione dei parametri del test

I parametri necessari per effettuare il test sono molteplici e sono stati acquisiti tramite due strumenti: la scheda di acquisizione NATIONAL INSTRUMENTS AT-MIO 16E-4 e l'oscilloscopio TEKTRONIX TDS 540A.

Il primo passo da effettuare, nell'ambito di questo test, è lo studio della struttura meccanica del "gas volume": questo si traduce in un controllo delle perdite di gas, visibili grazie al "bubbolatore", e in una verifica dell'assenza di scariche elettriche interne, cosa che può essere osservata monitorando la corrente che scorre tra gli elettrodi. Questa corrente può essere misurata in due modi: leggendo la tensione ai capi della resitenza da 100 $K\Omega$ che collega gli elettrodi a massa (vedi figura 5.12), oppure tramite l'alimentatore di alta tensione, il quale misura la corrente che scorre in ognuno dei suoi due canali. Per questo scopo è stata utilizzata la scheda della National Instruments, la quale è dotata, tra le altre cose, di vari convertitori analogico-digitale.

Per comprendere esattamente il funzionamento della camera, è indispensabile conoscere il valore della tensione a cui si stanno compiendo le varie misure: è quindi necessario usare l'alimentatore per ottenere questo valore.

Per quanto riguarda i parametri caratteristici del rivelatore, quello che si vuole stimare è l'efficienza della camera, cioè il numero di particelle passanti rivelate dalla camera rispetto al numero di particelle realmente passate; sapendo che la frequenza di conteggio in singola (cioè il numero di particelle al secondo che attraversano le PAD più il rumore dell'elettronica di lettura) aspettata è dell'ordine di $\sim 200\ Hz$ [2], è sufficiente conoscere la frequenza di conteggio delle singole PAD per verificare il corretto funzionamento della camera e delle schede di elettronica. Questo è stato fatto utilizzando i due contatori presenti sulla scheda di acquisizione della National Instruments.

[2]Questa è la frequenza aspettata per le PAD degli RPC dell'esperimento ARGO.

Per avere un maggior controllo del funzionamento del rivelatore, è utile poter guardare la forma dei segnali indotti sulle BIG PAD: poiché questi possono essere letti direttamente, senza cioè passare attraverso le schede di elettronica di front-end, come fanno invece i segnali delle strip, sono praticamente esenti da possibili errori di costruzione o montaggio, e la loro forma è indice di cosa accade all'interno della camera. Poiché l'oscilloscopio è lo strumento più adatto a questo scopo, è stato collegato al computer un TEKTRONIX TDS 540A.

Infine è stato deciso di acquisire i valori di pressione, umidità e temperatura, tramite tre sonde collocate sotto al RPC in test, poiché questi parametri ambientali influenzano il regime di "streamer limitato" a cui lavora il rivelatore; i segnali analogici forniti dalle tre sonde sono elaborati dalla scheda N.I. AT-MIO 16E-4.

Parametri	Strumenti	Periferiche
Corrente ai capi di $R = 100K\Omega$	N.I. AT-MIO 16E-4	N.I. PCI-MIO 16E-4
Corrente nell'alimentatore di HV	CAEN N570	CAEN A303
Tensione di alimentazione del RPC	CAEN N570	CAEN A303
Numero di eventi visti dalle PAD	N.I. AT-MIO 16E-4	N.I. PCI-MIO 16E-4
Forme d'onda delle BIG PAD	TEKTRONIX TDS 540A	N.I. PCI-GPIB
Parametri ambientali	Sonde esterne/AT-MIO	N.I. PCI-MIO 16E-4

Tabella 4.1: *Nella prima colonna sono mostrati i parametri necessari per il test, nella seconda gli strumenti che ne misurano il valore, e nella terza le periferiche del computer tramite le quali è possibile acquisirli.*

4.2.1 L'oscilloscopio TEKTRONIX TDS 540A

La comunicazione tra l'oscilloscopio e il computer avviene tramite un cavo GPIB (vedi fine paragrafo), connesso ad una scheda PCI-GPIB della National Instruments, che permette lo scambio di informazioni sotto forma di stringhe di caratteri. Questa comunicazione è gestita dal programma "GPIB Write-Read" (vedi figura 4.3) che consente di inviare ("$Write$") una qualsiasi sequenza di comandi al TDS 540A e leggere ("$Read$") l'eventuale risposta: in questo caso, a differenza di quanto avviene con l'alimentatore, non serve interpretare la risposta poiché questa è già sotto forma di caratteri leggibili (ad esempio, in risposta al comando che richiede la scala orizzontale si potrebbe avere una stringa del tipo "HORizontal:SCAle 5.00E-9").

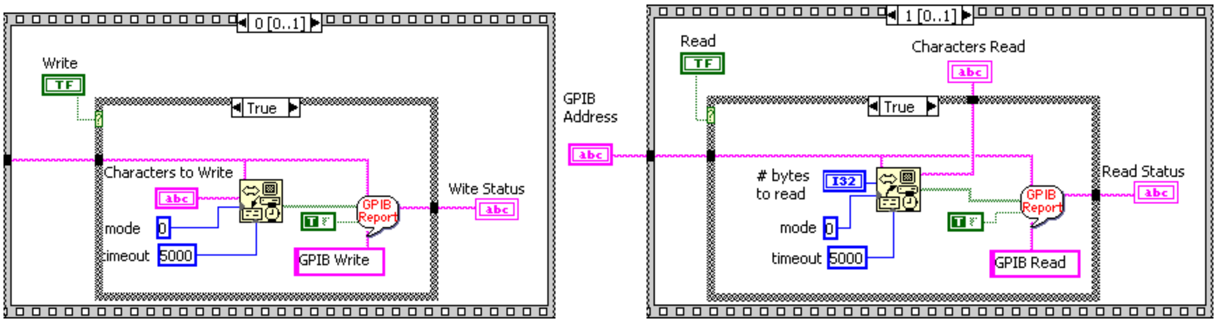


Figura 4.3: *Schema del programma "GPIB Write-Read".*

La prima operazione che viene compiuta è quella di inviare la stringa "Characters to write" allo strumento specificato dall'indirizzo "GPIB address", fornendo in caso di errore il codice relativo in "Write status"; successivamente viene letto un certo numero di caratteri "♯ of bytes to read" che vengono stampati in "Characters read", dando anche in questo caso la possibilità di risalire all'errore compiuto grazie a "Read status".

Il pannello di controllo dell'oscilloscopio è stato strutturato in modo tale da poter cambiare le sue impostazioni senza essere costretti a far ripartire il programma ogni volta (vedi figura 4.4): questo permette una gestione semplice e veloce dello strumento, paragonabile all'uso manuale; le stringhe di comando che consentono di fare queste operazioni sono state prese dal manuale fornito dalla casa e vengono utilizzate tramite il programma "GPIB Write-Read" menzionato precedentemente.

Poiché si è interessati a studiare il tipo di segnale indotto sulla BIG PAD, bisogna poter scrivere in qualche modo la forma d'onda su un file. Un modo semplice è quello di scrivere il valore della tensione corrispondente ad ogni campionamento dell'oscilloscopio e il tempo a cui viene fatto questo campionamento: tramite un qualsiasi programma di analisi, come per esempio *PAW* [17], sarà poi possibile graficare la tensione verso il tempo, ottenendo così la forma d'onda. Ripetendo questa operazione per gli altri tre canali dell'oscilloscopio, è possibile acquisire contemporaneamente i segnali sui quattro canali (vedi figura 4.7). Per poter avere sempre sotto controllo la situazione in cui sono state scritte le forme d'onda, si è pensato di inserire all'inizio del file un'intestazione in cui sono annotate le impostazioni dell'oscilloscopio all'atto della creazione del file.

È inoltre interessante conoscere la carica della particella che ha indotto il segnale sulla BIG PAD; quindi nel file di dati viene inserita, prima di scrivere la forma d'onda, la carica dei segnali sui quattro canali misurata tramite un algoritmo che calcola l'integrale del segnale ($Q = \int V dt$), tenendo conto di un eventuale "offset".

Per ottimizzare l'acquisizione dei dati, l'oscilloscopio viene impostato in maniera

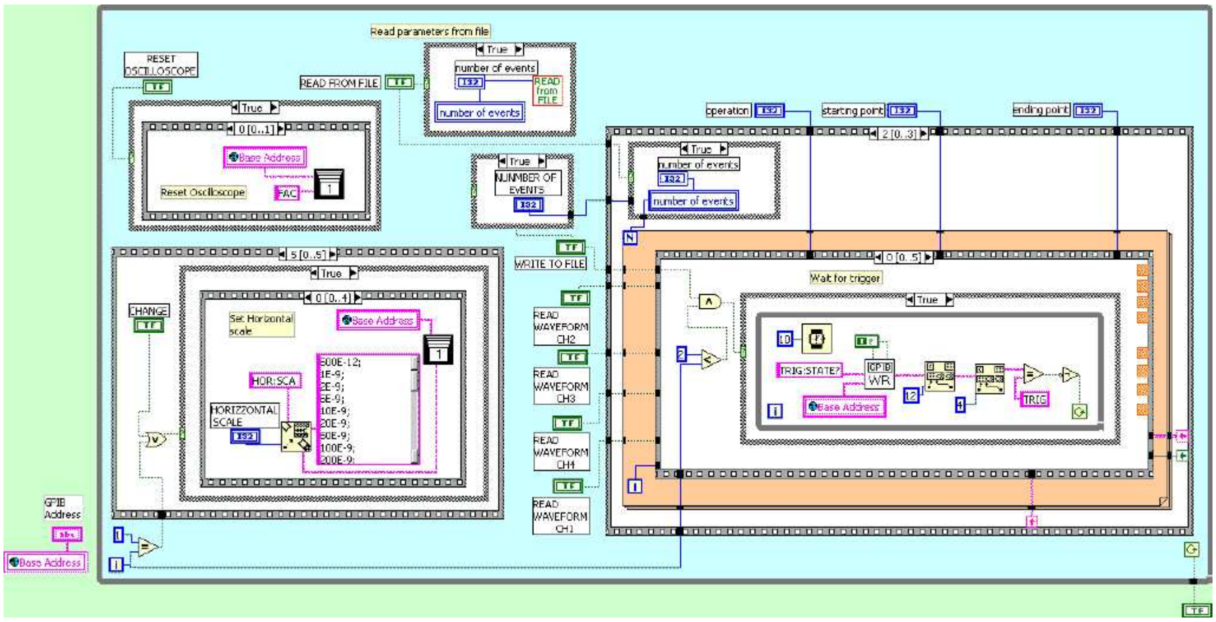


Figura 4.4: *Schema del programma "PanelTDS540".*

tale da richiedere un "trigger" prima di cominciare la scrittura su file della forma d'onda (vedi figura 4.4): infatti, se l'oscilloscopio acquisisse in maniera continua, verrebbero scritti sia eventi di fisica che rumore, cioè qualsiasi segnale si trovi sui canali dello strumento al momento della comunicazione col computer. Poiché solo in presenza di un nuovo "trigger" viene scritta la nuova forma d'onda su file, questo accorgimento serve anche ad evitare che venga acquisito più di una volta lo stesso evento.

L'interfaccia GPIB

Il protocollo di trasmissione *GPIB* (General Purpose Instrument Bus),un tempo noto col nome di HPIB, è stato sviluppato dalla Hewlett Packard per la comunicazione ed il controllo di strumenti programmabili, ed in seguito è stato uniformato allo standard internazionale IEEE-488, diventando GPIB.

Ci sono tre tipi di periferiche collegabili al bus IEEE-488: "Listeners", "Talkers" e "Controllers". I primi possono ricevere dati dal bus quando istruiti dal controller, mentre i secondi trasferiscono dati quando istruiti; i controller permettono quindi la gestione degli altri due tipi di periferiche. Possono essere connesse al massimo 15 periferiche sullo stesso bus; la configurazione minima prevede un controller ed un listener od un talker (esempio un HP700 con interfaccia IEEE-488 ed un voltmetro).

L'interfaccia IEEE-488 è formata da 16 linee di segnale e da 8 linee di massa. Le 16 linee sono divise in tre gruppi: 8 linee di dati (usate per trasferire indirizzi, informazioni di controllo e dati), 3 linee di "handshake" (controllano il traferimento dei caratteri tra le periferiche garantendo che non ci siano errori di trasmissione) e 5 linee di gestione dell'interfaccia (gestiscono il flusso di dati e di controlli sull'interfaccia).

4.2.2 La scheda di acquisizione N. I. AT-MIO 16E-4

La scheda di acquisizione AT-MIO 16E-4 è connessa al computer mediante un'apposita scheda PCI (la PCI-MIO 16E-4) che riceve i segnali così come vengono acquisiti (non esiste quindi un protocollo di trasmissione) e li elabora in modo che possano essere letti mediante Labview.

Uno dei programmi sviluppati per questa scheda è quello che misura la frequenza delle particelle viste dalle PAD. La AT-MIO 16E-4 è dotata di due contatori in grado di leggere solo livelli logici TTL. Poiché i segnali in uscita dalle schede di elettronica del RPC non sono TTL, si è pensato di discriminarli attraverso un modulo NIM, per poi convertire il segnale dalla logica NIM a quella TTL. Il programma "Event Counter" usa alcuni sottoprogrammi scritti dalla National Instruments per l'utilizzo di questi contatori; le modifiche fatte consistono nel permettere di contare contemporaneamente

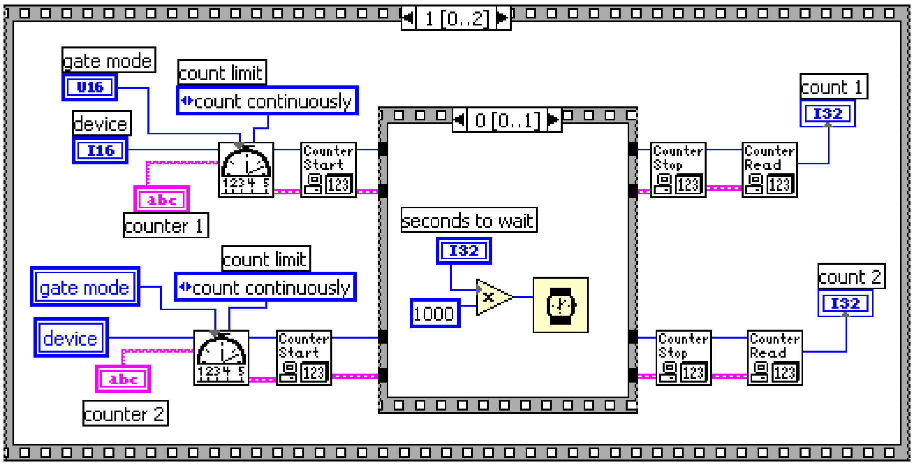


Figura 4.5: *Schema del programma "Event Counter".*

i segnali sui due contatori per un tempo impostato dall'utente, dando l'ora di inizio e fine conteggio in modo da essere sicuri che il tempo impostato sia stato rispettato (dovendo fare una misura di frequenza, è molto importante essere sicuri del tempo impiegato per effettuare il conteggio).

Di diversa concezione, invece, è il programma che consente l'acquisizione dei parametri ambientali attraverso le sonde esterne. Queste sono costruite in maniera tale da fornire una corrente proporzionale al valore del parametro che si sta misurando e variabile tra 4 e 20 mA, dove 4 mA corrisponde al valore minimo misurabile, mentre 20 mA è il valore massimo: ad esempio se si vuole misurare la pressione bisogna sapere

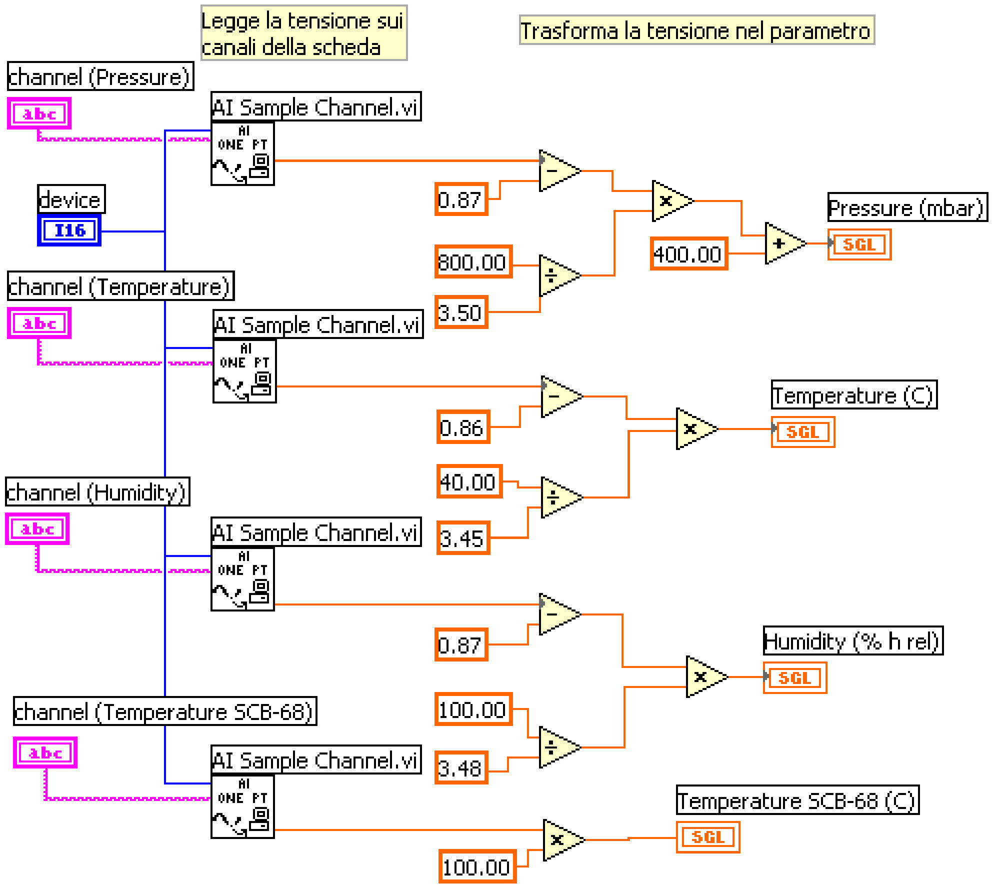


Figura 4.6: *Schema del programma "Acquire PTHT" che permette la lettura delle condizioni ambientali.*

che la sonda permette misure tra 800 e 1200 $mbar$ per poter associare 4 mA a 800 $mbar$, e 20 mA a 1200 $mbar$. Allo stesso modo si misura la temperatura (variabile tra 0 e 40 $°C$) e l'umidità (variabile tra 0 e 100%). Poiché la scheda è in grado di leggere una tensione e non una corrente, è stata posta una resistenza da 200 Ω all'ingresso di ognuno dei tre canali analogici collegati alle sonde: basterà misurare la tensione su questi canali per conoscere le condizioni ambientali; questo è proprio quello che fa il programma "Acquire PTHT" (vedi figura 4.6). Inoltre è stata anche misurata la temperatura sulla scheda, grazie ad un termometro al suo interno, per confrontare i due valori.

Sullo stesso principio si basa il programma "Acquire 4 Current", che, leggendo la tensione ai capi della resitenza da 100 $K\Omega$ che collega gli elettrodi degli RPC a massa, permette la misura della corrente che scorre negli elettrodi.

4.3 Il programma di test degli RPC

Tutti i programmi menzionati precedentemente sono stati riuniti nel sistema di acquisizione dati finale "Test". Allo scopo di semplificarne l'uso, questo è stato strutturato in modo tale da essere completamente automatico e il suo pannello di controllo è stato ridotto al minimo: ciò implica che prima di far partire un'acquisizione bisogna impostare sia l'alimentatore sia l'oscilloscopio.

Quello che interessa è l'andamento al variare della tensione dei parametri da acquisire. Il programma "Test" può essere visto come una sequenza di operazioni in cui la prima consiste nel portare la tensione del RPC al valore prefissato, dopodiche vengono misurati e scritti su file i parametri di cui sopra (nell'ordine: parametri ambientali, tensione di alimentazione, corrente nella camera, frequenze di conteggio e forme d'onda) prima di passare al successivo valore di tensione (una delle cose richieste all'utente è quella di fornire i valori di tensione a cui misurare i parametri).

Per facilitare l'analisi dei dati, questi sono stati scritti su tre tipi di file diversi, e per ognuno di questi è stato successivamente creato, tramite il linguaggio di programmazione C, un programma che li modifica per permetterne l'utilizzo da parte di PAW (vedi appendice B). Dei tre tipi di file, uno è creato dal pannello di controllo dell'oscilloscopio ed è stato visto in precedenza (vedi figura 4.7), mentre gli altri due sono creati dal programma finale di test. In uno di questi due vengono scritte le cariche dei segnali sui quattro canali dell'oscilloscopio per ogni evento acquisito e per ogni valore di tensione impostato (vedi figura 4.8): in questo modo sono facilmente ottenibili le distribuzioni di carica. Il terzo tipo di file è quello che racchiude la maggior parte delle misure effettuate; è quindi necessario creare un'intestazione che permetta di associare ad ogni numero una grandezza fisica (vedi figura 4.9).

```
:TRIG:MAI:MOD NORM;TYP EDGE;LEV 10.0E-3;HOL:VAL 0;
:TRIG:MAI:EDGE:SOU CH2;COUP DC;SLO RIS;:TRIG:MAI:LOGI:CLA PAT;
FUNC AND;THR:CH1 1.200E+0;CH2 1.200E+0;CH3 1.200E+0;CH4 1.200E+0;
:TRIG:MAI:LOGI:INP:CH1 :HOR:MAI:SCA 2.0E-6
:CH1:SCA 100.0E-3;POS 0.0E+0;OFFS 0.0E+0;COUP DC;IMP MEG;BAN FUL
:CH2:SCA 20.0E-3;POS -2.88E+0;OFFS 0.0E+0;COUP DC;IMP FIF;BAN FUL
:CH3:SCA 500.0E-3;POS 900.0E-3;OFFS 0.0E+0;COUP DC;IMP FIF;BAN FUL
:CH4:SCA 500.0E-3;POS -1.34E+0;OFFS 0.0E+0;COUP DC;IMP FIF;BAN FUL

EVENT = 1 - 03/08/00 15.58.49
Q(CH1)=NaN - Q(CH2)=375.160000E-3 - Q(CH3)=NaN - Q(CH4)=NaN
-2.000000E-6 0.000000E+0 -3.212500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
-1.960000E-6 0.000000E+0 -4.012500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
-1.920000E-6 0.000000E+0 -4.012500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
-1.880000E-6 0.000000E+0 -4.812500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
-1.840000E-6 0.000000E+0 -3.212500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
     .
     .
     .
     .
1.784000E-5 0.000000E+0 -3.212500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
1.788000E-5 0.000000E+0 -3.212500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
1.792000E-5 0.000000E+0 -3.212500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
1.796000E-5 0.000000E+0 -4.012500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
EVENT = 2 - 03/08/00 15.58.51
Q(CH1)=NaN - Q(CH2)=395.400000E-3 - Q(CH3)=NaN - Q(CH4)=NaN
-2.000000E-6 0.000000E+0 -4.012500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
-1.960000E-6 0.000000E+0 -3.212500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
-1.920000E-6 0.000000E+0 -3.212500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
-1.880000E-6 0.000000E+0 -3.212500E-3 0.000000E+0 0.000000E+0
```

Figura 4.7: *File di dati scritto dal programma "PanelTDS540". Dopo una breve intestazione si nota il numero di evento con la data di acquisizione, la carica sui quattro canali (NaN = canale spento) espressa in nC e una tabella dove nella prima colonna vi sono i tempi a cui viene effettuato il campionamento e nelle altre quattro i valori delle tensioni sui quattro canali.*

```
9000 1 NaN 0.334840 NaN NaN
9000 2 NaN 0.266760 NaN NaN
9000 3 NaN 0.208520 NaN NaN
.
.
.
9000 99 NaN 0.382200 NaN NaN
9000 100 NaN 0.102920 NaN NaN
9500 1 NaN 0.257160 NaN NaN
9500 2 NaN 0.453880 NaN NaN
```

Figura 4.8: *File di dati che permette lo studio della distribuzione di cariche: nella prima colonna è scritto il valore di alta tensione, nella seconda il numero di evento acquisito a questo valore di HV, e nelle altre quattro le cariche, espresse in nC, sui canali dell'oscilloscpopio.*

```
step num|P(mbar)|T(C)|H(% h rel)|T SCB-68(C)|HV|TIME Vm,V0,Im
|Vmon|Imon|V0|I RPC1|I RPC2|I RPC3|I RPC4|V0|TIME start|COUNTPAD1
|COUNTPAD2|TIME  end|<Q> CH1|sigma<Q>CH1|<Q> CH2|sigma<Q> CH2
|<Q> CH3|sigma<Q> CH3|<Q> CH4|sigma<Q> CH4|
==============================================================
0 1004.714294 31.242754 41.226654 35.644531 9000 03 08 2000
15 45 45 8995 1 9000 -2.392578 0.000000 0.000000 0.000000
03 08 2000 15 45 45 -2147483648 -2147483648 03 08 2000 15 45 45
NaN NaN 0.434790 0.459745 NaN NaN NaN NaN

1 1003.598206 31.186142 41.086342 35.644531 9500 03 08 2000
15 50 06 9493 2 9500 -3.759766 0.000000 0.000000 0.000000
03 08 2000 15 50 06 -2147483648 -2147483648 03 08 2000 15 50 06
NaN NaN 0.481380 0.675526 NaN NaN NaN NaN

2 1004.714294 30.959692 41.226654 36.132812 10000 03 08 2000
15 54 26 9995 4 10000 -6.250000 0.000000 0.000000 0.000000
03 08 2000 15 54 27 -2147483648 -2147483648 03 08 2000 15 54 27
NaN NaN 0.481187 0.787300 NaN NaN NaN NaN
  .
  .
```

Figura 4.9: *File di dati in cui sono presenti la maggior parte delle misure effettuate. Seguendo l'intestazione è possibile risalire ad ogni parametro acquisito.*

Capitolo 5

Analisi dei risultati del test

In questo capitolo verranno presentati i risultati dei test eseguiti sugli RPC dell'esperimento ARGO. Nella prima parte verrà descritto uno studio effettuato sulla struttura meccanica del RPC di ARGO: è stata misurata la deformazione della gap tra le lastre di bakelite, dovuta alla pressione esercitata per chiudere il box di contenimento, al fine di valutare l'efficacia di un'eventuale modifica alla struttura per ridurre questa deformazione.

Nella seconda parte, invece, verranno presentati i risultati dei test sui primi esemplari di RPC prodotti in serie. Questi test sono stati effettuati con il duplice scopo di controllarne il funzionamento, in modo da evidenziare eventuali errori di costruzione prima della messa in funzione dell'apparato, e di verificare che i rivelatori così prodotti rispettino tutte le caratteristiche previste dall'esperimento.

5.1 Misura della deformazione della gap di un RPC

In questa paragrafo verrà mostrata una misura volta a calcolare la deformazione della gap di un RPC dovuta alla pressione esercitata sul piano di strip dalla box di contenimento del RPC stesso.

L'uniformità della gap è una caratteristica molto importante in un RPC, e in generale in un qualsiasi rivelatore a ionizzazione, in quanto da essa dipende l'uniformità del campo eletrico tra le lastre di bakelite; infatti uno schiacciamento locale della gap porta ad un aumento locale del campo ($E = V/d$, dove V, tensione applicata, è fissa) con conseguente ripercussione sul funzionamento locale del rivelatore.

In figura 5.1a è mostrata la deformazione aspettata della gap in seguito alla pressione sul piano di strip: poiché i distanziatori (o spaziatori) sono praticamente indeformabili, lo schiacciamento delle strip (ovvero del foam ad esse incollato) comporta una deformazione variabile della lastra superiore di bakelite, maggiore via via che ci si allontana dagli spaziatori. Per evitare questo fenomeno si è pensato di posizionare dei dischetti di carta da 0.2 mm in corrispondenza degli spaziatori in modo che lo schiac-

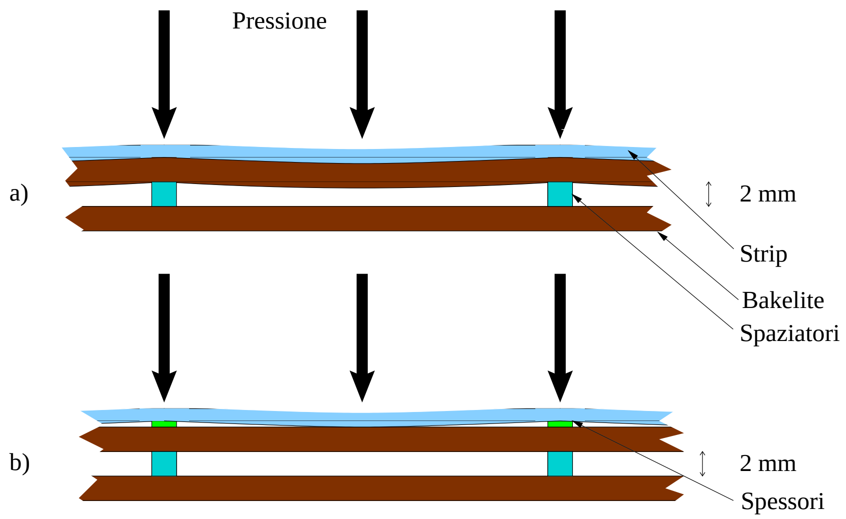


Figura 5.1: *Deformazione aspettata della gap di un RPC, senza e con spessori.*

ciamento del piano di strip non coinvolga la lastra superiore di bakelite (vedi figura 5.1b).

5.1.1 Descrizione della misura

La camera di prova è stata poggiata su un piano di riferimento, e successivamente spianata ponendo pesi di piombo intorno alla zona di misura. In questo modo la zona dove vengono effettuate le misure risulta isolata da tensioni meccaniche provenienti dalle zone circostanti. La zona di misura è costituita da un quadrato con lato di 15 cm centrato su quattro spaziatori, distanti tra loro 10 cm: il punto di misura si trova al centro di questa zona (figura 5.2a).

Per misurare l'effeto degli *spessori* di carta da 0.2 mm che si prevede posizionare sulla bakelite in corrispondenza degli spaziatori, sono state effettuate due insiemi di misure, con e senza *spessori* di carta inseriti. Per prima cosa è stato messo sopra la bakelite (senza *spessori*) un pezzo di strip con sovrapposto un piano di plastica spesso 0.5 cm, entrambi forati per permettere l'inserimento di un comparatore centesimale per la misura della deformazione della bakelite. Il comparatore centesimale misura la quota del piano superiore di bakelite al variare della pressione esercitata sulla strip. Il piano inferiore di bakelite è posizionato su un piano di riscontro che ne mantiene fissa

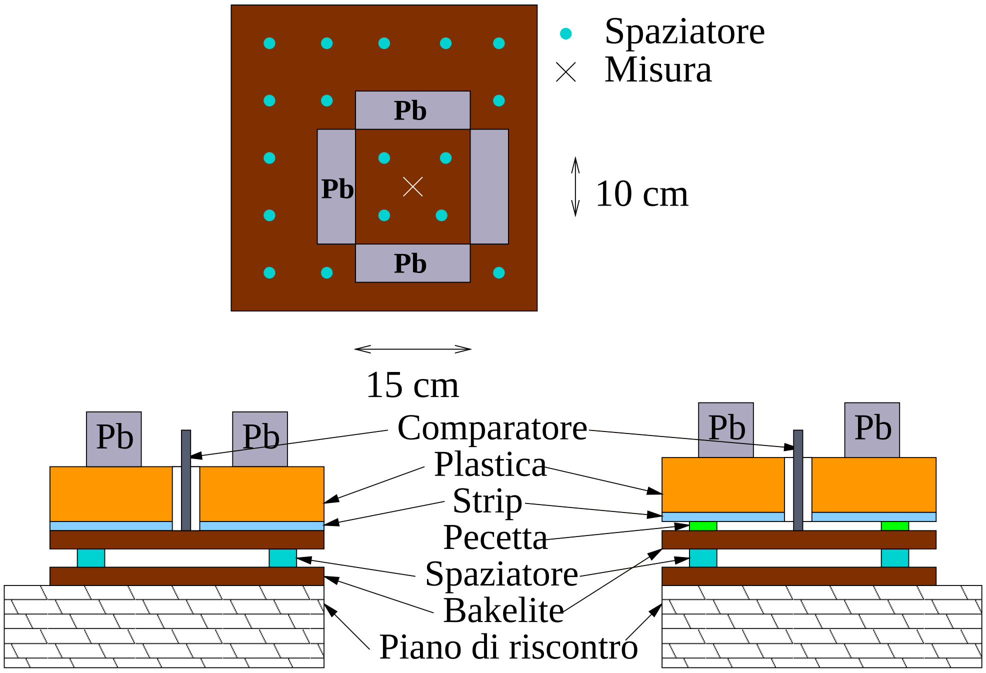


Figura 5.2: *Visione in pianta e sezione della configurazione di misura.*

la posizione. La pressione viene ottenuta caricando uniformemente la lastra di plastica con pesi di piombo da 367 g l'uno (figura 5.2b). La seconda parte della misura consiste nel ripetere quanto detto prima, ponendo però tra la lastra superiore di bakelite e la strip gli *spessori*, posti in corrispondenza degli spaziatori che mantengono lo spessore della gap a 2 mm (figura 5.2b).

5.1.2 Risultati

Nelle figure 5.3 e 5.4 sono mostrati gli andamenti dell'indicazione del comparatore posto a contatto della lastra superiore di bakelite, con e senza *spessori*, in funzione della pressione esercitata. L'andamento sovrapposto ai dati sperimentali è stato ottenuto con un fit lineare in entrambi i casi (con e senza *spessori*): si può così stimare la posizione della lastra di bakelite per una data pressione di lavoro.

Utilizzando i fit ottenuti da due diversi set di misure, si è potuto ricavare le tabelle 5.1 e 5.2, dove nella prima colonna è riportata la quota della bakelite senza caricare i

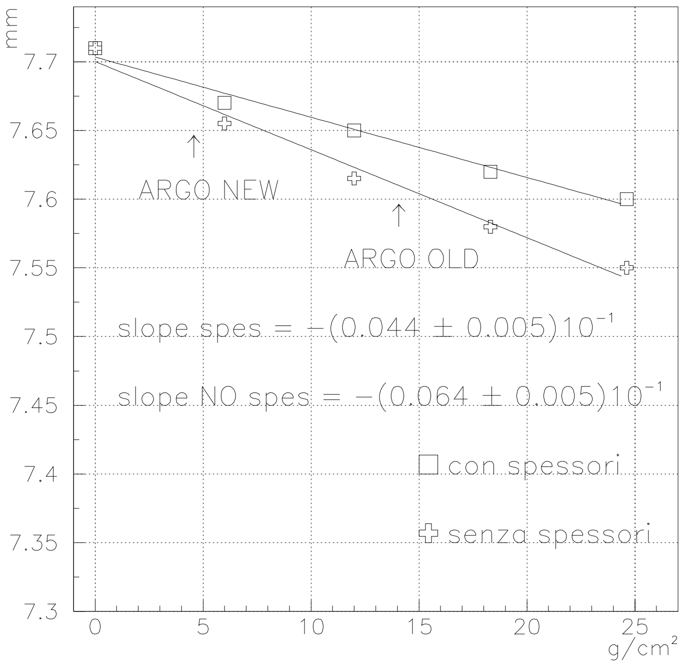


Figura 5.3: *Variazione di quota (mm), con e senza* spessori*, in funzione della pressione esercitata (g/cm^2), per il set di misura 1.*

pesi (0 g/cm^2), nella seconda vi è la quota alla pressione di lavoro prevista per ARGO (4.5 g/cm^2), e nella terza vi è la variazione della gap del RPC.

	quota (0 g/cm^2) (mm)	quota (4.5 g/cm^2) (mm)	Δgap (μm)
misura 1	7.700	7.671	29
misura 2	7.700	7.671	29

Tabella 5.1: *Quota della lastra superiore di bakelite e variazione gap RPC, calcolata come differenza tra la quota della bakelite senza pesi e quella alla pressione di ARGO,* ***senza spessori***.

La pressione esercitata sugli RPC di ARGO è stata calcolata tenendo presente la struttura meccanica di contenimento definitiva, che prevede una centinatura a vuoto di 4 mm su 625 cm. Con lo spessore di 15 mm di foam e i due piani di Al da 0.3 mm, il peso necessario per spianare la struttura è di $150 \div 170$ Kg, che corrisponde ad un pressione di $4.2 \div 4.8$ g/cm^2.

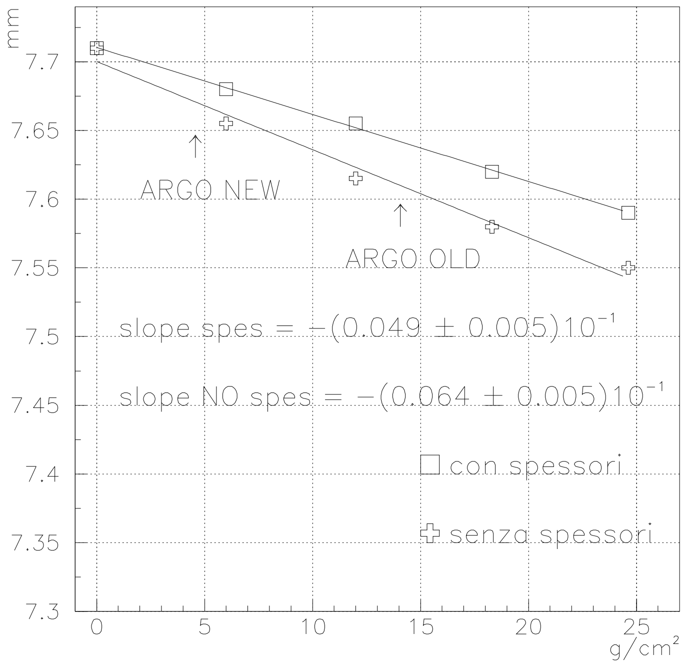


Figura 5.4: *Variazione di quota* (mm)*, con e senza* spessori*, in funzione della pressione esercitata* (g/cm^2)*, per il set di misura 2.*

	quota (0 g/cm^2) (mm)	quota (4.5 g/cm^2) (mm)	Δgap (μm)
misura 1	7.703	7.684	19
misura 2	7.710	7.688	22

Tabella 5.2: *Quota della lastra superiore di bakelite e variazione gap RPC, calcolata come differenza tra la quota della bakelite senza pesi e quella alla pressione di ARGO,* ***con spessori****.*

È stata eseguita poi un'ulteriore misura senza la strip, ovvero senza il foam ad essa incollato: una lastra di alluminio da 1 cm di spessore è stata sovrapposta alla bakelite. Il comparatore in questo altro caso non ha rivelato deformazioni sensibili al variare del carico sulla lastra di alluminio da 0 g/cm^2 a 25 g/cm^2.

5.1.3 Variazione del campo elettrico

Il campo elettrico dentro la gap tra le lastre di bakelite è dato da

$$E_{gap} = \frac{V_0}{\delta_2 + 2\delta_1 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \tag{5.1}$$

dove

- V_0 è la d.d.p. applicata alle lastre di bakelite
- δ_2 è la gap tra le lastre di bakelite
- ε_2 è la costante dielettrica della miscela di gas (ε_2 = 1)
- δ_1 è lo spessore delle lastre di bakelite (δ_1 = 2 mm)
- ε_1 è la costante dielettrica della bakelite (ε_1 = 6.2)

	E (V/mm) 0 g/cm^2	E (V/mm) 4.5 g/cm^2		ΔE/E (%)		$V_0^{'}$ (Volt)	
		ss	cs	ss	cs	ss	cs
misura 1	3780	3822	3808	1.1	0.7	10110	10073
misura 2	3780	3822	3812	1.1	0.8	10110	10083

Tabella 5.3: *Campo elettrico tra le lastre di bakelite, con e senza* spessori *(rispettivamente cs e ss), per due diversi valori di pressione, e tensione di alimentazione equivalente.*

Nella tabella 5.3 sono riportati i valori del campo elettrico E dentro la gap, come dato dalla (5.1), in funzione della pressione esercitata sulla gap (è stato assunto un valore di 10 kV per V_0), e la tensione di alimentazione equivalente del RPC schiacciato (cioè la tensione con cui bisogna alimentare un RPC non schiacciato per ottenere lo stesso campo elettrico che si osserva in seguito allo schiacciamento della gap).

In figura 5.5 è mostrato l'andamento della risoluzione temporale della PAD in funzione della tensione di alimentazione: questa curva è stata misurata presso i laboratori I.N.F.N. dell'università di Tor Vergata e gentilmente fornita dal gruppo ARGO - Roma 2 [18]. Confrontando questa curva con la tabella 5.3 risulta chiaro che la deformazione della gap non comporta variazioni di risoluzione temporale. Si nota infatti che una variazione di $\sim$ 100 $Volt$ a 10 kV di alimentazione (effetto dello schiacciamento della gap) determina variazioni trascurabili nella risoluzione temporale.

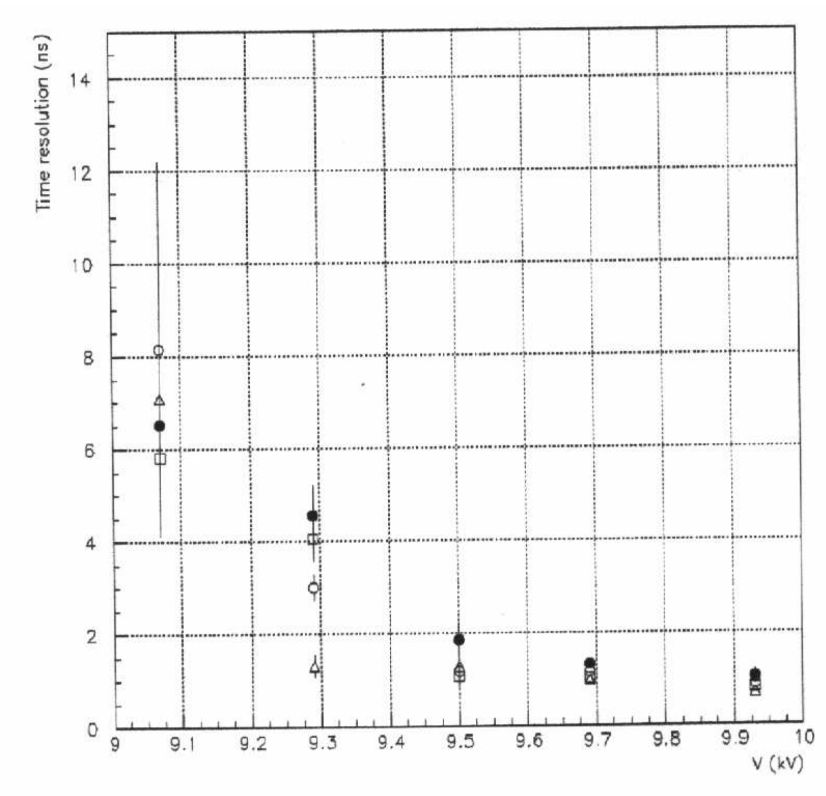


Figura 5.5: *Risoluzione temporale di quattro diverse PAD in funzione dell'alta tensione.*

5.1.4 Isteresi

È stato evidenziato un fenomeno di isteresi nella deformazione della bakelite. Graficando le quote misurate aumentando e successivamente diminuendo la pressione sulle strip (figg. 5.6 e 5.7) si osserva una variazione tra le misure effettuate aumentando la pressione e quelle effettuate diminuendola, di circa 15 μm. Il fenomeno di isteresi è imputabile unicamente alla bakelite: da un'ulteriore misura effettuata caricando i pesi direttamente su questa (fig. 5.8), togliendo cioè le strip e facendo in modo che il peso non si scarichi sui distanziatori, si osserva una variazione di circa 15 μm.

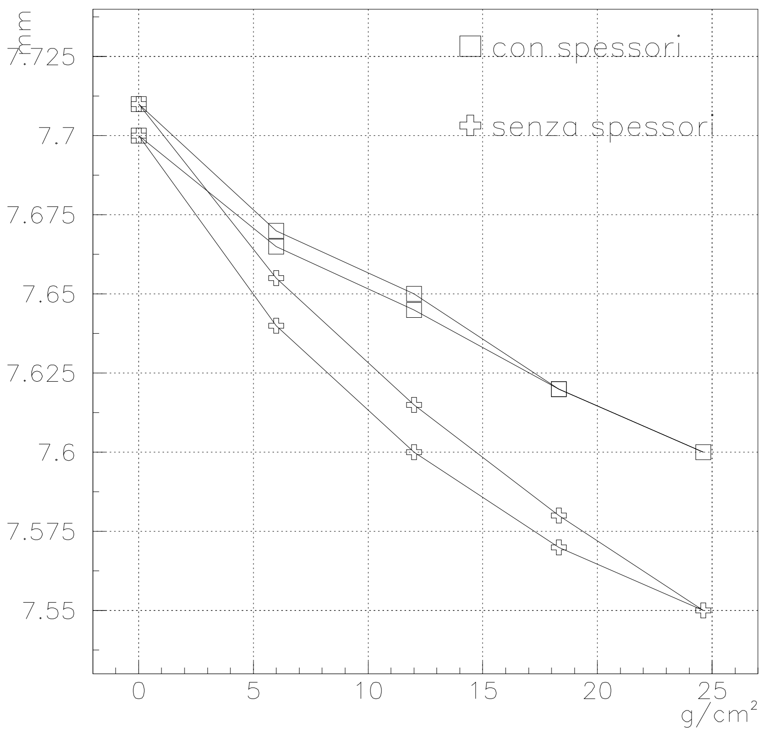


Figura 5.6: *Isteresi nella misura 1; per ogni curva, i punti in alto sono presi aumentando la pressione, quelli in basso diminuendola.*

5.1.5 Conclusioni sulla deformazione della gap

Le misure effettuate sulla deformazione della gap del RPC sono riassunte nei seguenti punti:

i) In assenza del piano di strip non si è evidenziata alcuna deformazione, sia senza che con gli *spessori*. Nel lato a contatto con il piano centinato di Al gli *spessori* non hanno alcuna funzione.

ii) La pressione sul piano di strip deforma la gap del RPC sia con che senza gli *spessori*. La presenza degli *spessori* diminuisce la deformazione da $\sim 30\ \mu m$ a $\sim 20\ \mu m$ alla pressione prevista dalla meccanica di ARGO.

iii) La variazione del campo elettrico dentro la gap è $\sim 1\%$ sia con che senza gli *spessori*. Questa variazione risulta essere ininfluente sulla risoluzione temporale del RPC.

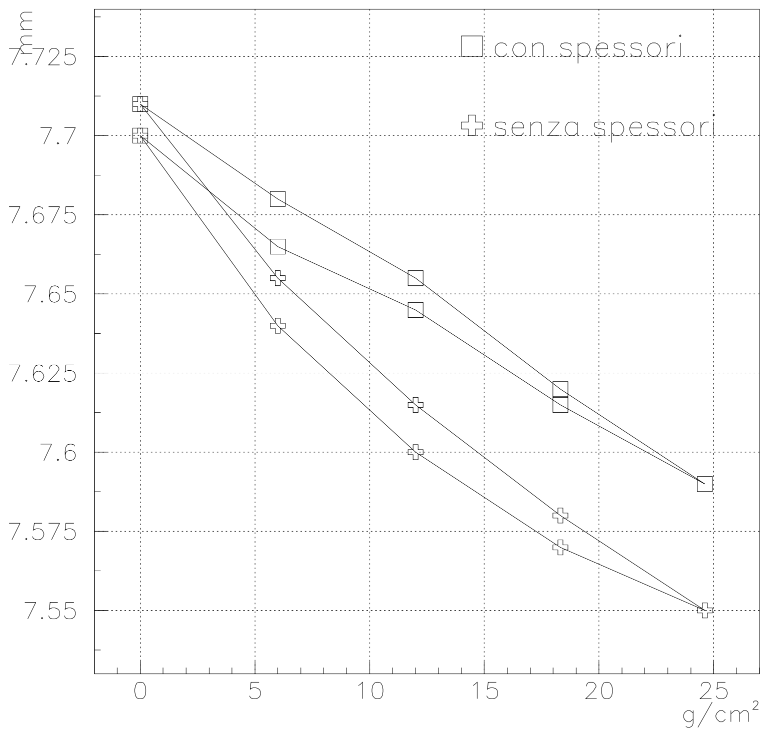


Figura 5.7: *Isteresi nella misura 2; per ogni curva, i punti in alto sono presi aumentando la pressione, quelli in basso diminuendola.*

iv) È stato evidenziato un fenomeno di isteresi della bakelite, il cui contributo alla disomogeneità della gap è di circa 15 μm, confrontabile quindi con l'effetto degli *spessori* sulla variazione della gap.

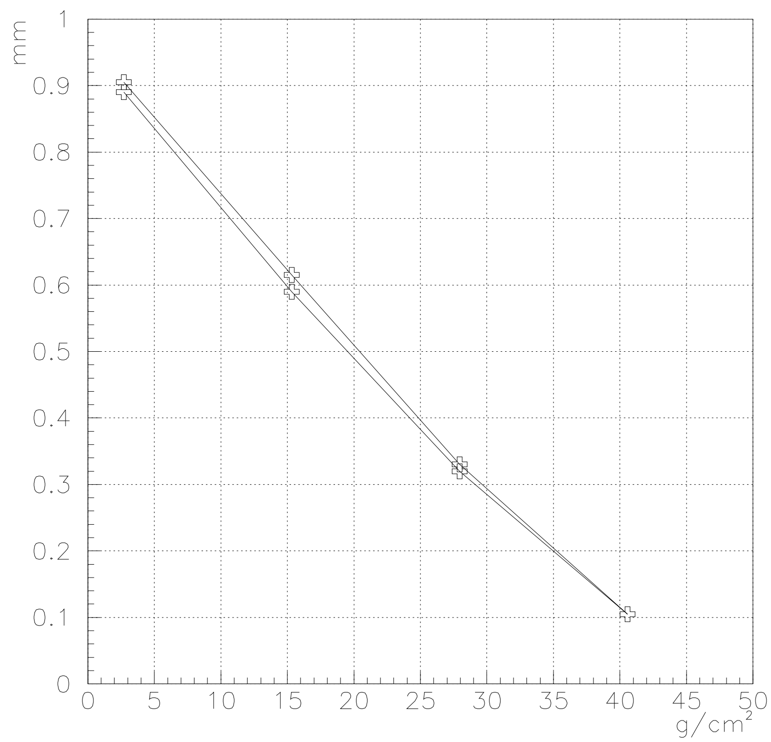


Figura 5.8: *Isteresi senza strip; i punti in alto sono presi aumentando la pressione, quelli in basso diminuendola.*

5.2 Test degli RPC di ARGO

È stato effettuato un test su un campione delle prime 40 camere costruite per l'esperimento ARGO-YBJ. È stata installata presso la fabbrica una stazione di test (vedi figure 5.9 e 5.10) con la quale si è effettuato il condizionamento degli RPC e sono stati misurati i parametri di funzionamento delle camere menzionati nel capitolo 4. Sono state sottoposte alla procedura di condizionamento e alle successive misure 6 camere delle 40 prodotte; in particolare sono state sottoposte a test le camere: 10001, 10002, 10003, 10004, 10006, 10007. Le misure relative alla corrente assorbita dalla camera, alla frequenza di conteggio in singola delle PAD e alla carica dei segnali indotti sulla "BIG PAD" sono riportate in seguito.

Figura 5.9: *Stazione di test installata presso la fabbrica degli RPC.*

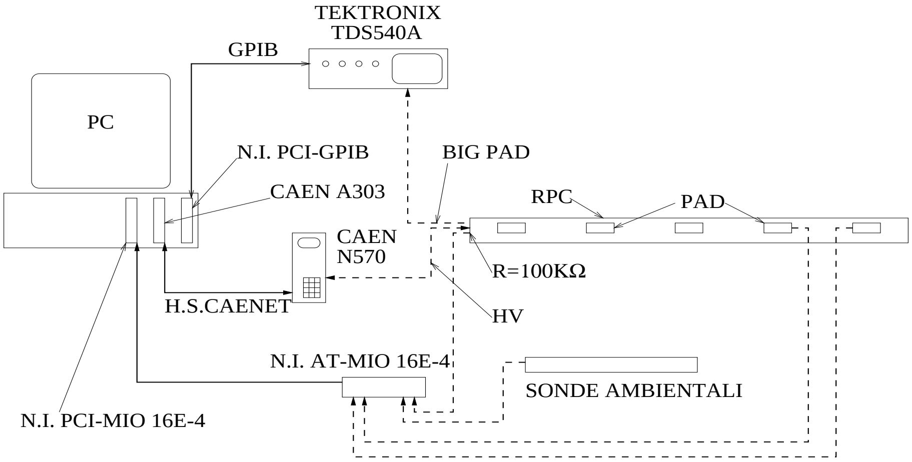


Figura 5.10: *Schema dei collegamenti per l'acquisizione dei parametri del test.*

5.2.1 Condizionamento degli RPC

Le camere sono state flussate dapprima con CO_2 puro per effettuare un primo lavaggio della "gap", in seguito è stata utilizzata la miscela gassosa stabilita per l'esperimento ARGO-YBJ (Argon 15%, Tetrafluoretano (R134A) 75%, e Iso-butano 10%); il lavaggio del "gas volume" è una procedura obbligata per ogni RPC nuovo, perché permette di rimuovere le impurità residue, provenienti dalla costruzione del RPC stesso, che potrebbero compromettere il suo funzionamento. In questa fase è stata controllata l'effettiva tenuta del gas da parte della "gap" mediante un "bubbolatore"; non sono stati riscontrati difetti sotto questo punto di vista.

Successivamente è stato effettuato il condizionamento degli RPC: questa è un'operazione che consiste nel variare l'alta tensione delle camere a passi discreti, crescenti e decrescenti, al fine di *i)* bruciare le eventuali impurità residue, dovute alla costruzione del rivelatore, grazie all'innesco di microscariche e *ii)* migliorare il funzionamento del rivelatore; si è visto, infatti, che RPC accesi senza essere condizionati avevano un'efficienza minore e, in generale, un comportamento peggiore di quelli condizionati.

Il condizionamento delle primissime camere prodotte è stato effettuato con una procedura manuale in cui il valore e la durata di ogni passo sono stati stabiliti empiricamente. La frequenza di conteggi di singola (cioè il numero di particelle al secondo che attraversano le PAD più rumore dell'elettronica di lettura) e la corrente assorbita sono state monitorate continuamente durante il processo di condizionamento. Le camere successive sono state condizionate con una procedura automatica, stabilita in seguito alle misure effettuate manualmente, mediante l'uso dei programmi di Labivew scritti per l'alimentatore di alta tensione.

5.2.2 Configurazione sperimentale per il test

Successivamente al condizionamento è stato effettuato un test per misurare alcuni parametri fondamentali di funzionamento degli RPC. In figura 5.11 è mostrata la configurazione sperimentale degli RPC utilizzata per effettuare le misure. Gli RPC sono stati disposti uno sopra l'altro e collegati in serie ad un unica linea del gas.

Le camere sono state alimentate tramite il modulo di alta tensione CAEN N570 dotato di due canali. Le schede di elettronica per la lettura dei segnali delle strip sono state alimentate con le tensioni previste dal costruttore, cioè V = -5 $Volt$ con la soglia fissata a V = -1 $Volt$. I segnali delle strip provenienti da queste schede sono stati messi in OR tramite una scheda dedicata che genera in uscita un segnale in logica NIM o TTL; questo segnale viene poi inviato alla scheda AT-MIO 16E-4 per effettuare misure di conteggi di PAD.

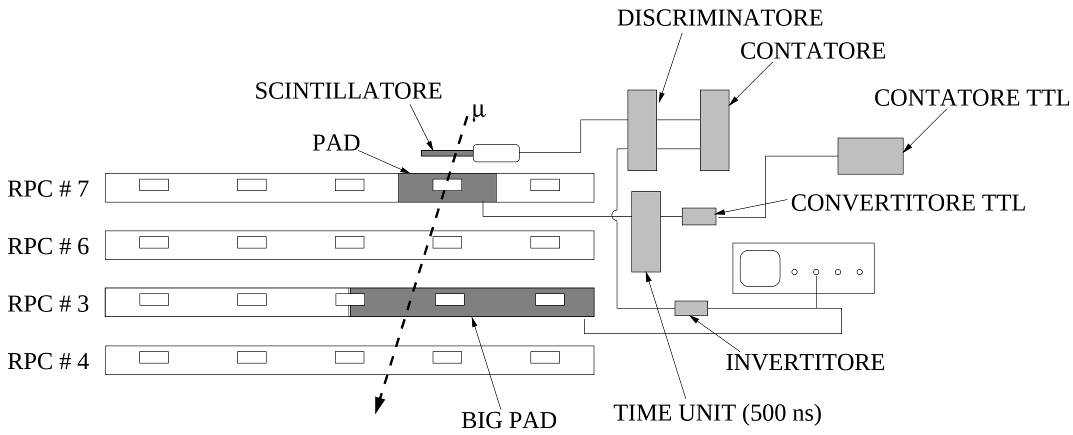


Figura 5.11: *Configurazione sperimentale.*

Il segnale della BIG PAD viene prelevato ai capi della resistenza da 1 $k\Omega$ che collega il foglio di rame su cui vengono indotti i segnali alla struttura meccanica del RPC. In figura 5.12 sono riportati *i)* una fotografia di una parte delle camere di ARGO relativa alle connessioni per l'HV, la corrente di camera e la BIG PAD, e *ii)* il relativo schema elettrico. Poiché la tensione di alimentazione degli RPC viene applicata alla lastra superiore di bakelite, i segnali indotti sulla BIG PAD avranno la stessa polarità dell'alta tensione (vedi figura 3.3); nelle misure riportate di seguito è stata usata una tensione di alimentazione positiva, tale quindi da indurre segnali positivi sulla BIG PAD. Il segnale di BIG PAD viene acquisito tramite un oscilloscopio digitale, discriminato e formato in modo da poter essere utilizzato in una logica di trigger.

La corrente che scorre nella camera viene acquisita leggendo la tensione ai capi della resitenza da 100 $K\Omega$ che collega gli elettrodi a massa (vedi figura 5.12), oppure tramite l'alimentatore di alta tensione, il quale misura la corrente che scorre in ognuno dei suoi due canali.

5.2.3 Risultati delle misure di corrente e di conteggi

In figura 5.13 sono mostrati gli andamenti della corrente che scorre nell'alimentatore e nelle camere numero 10007 e 10003 in funzione dell'alta tensione; le misure sono state effettuate con le condizioni atmosferiche riportate in figura. Per tensioni inferiori alla formazione di streamer, si ha passaggio di corrente all'interno della gap attraverso i distanziatori, nonostante la loro elevata resistività (zona "ohmica"); raggiunta la

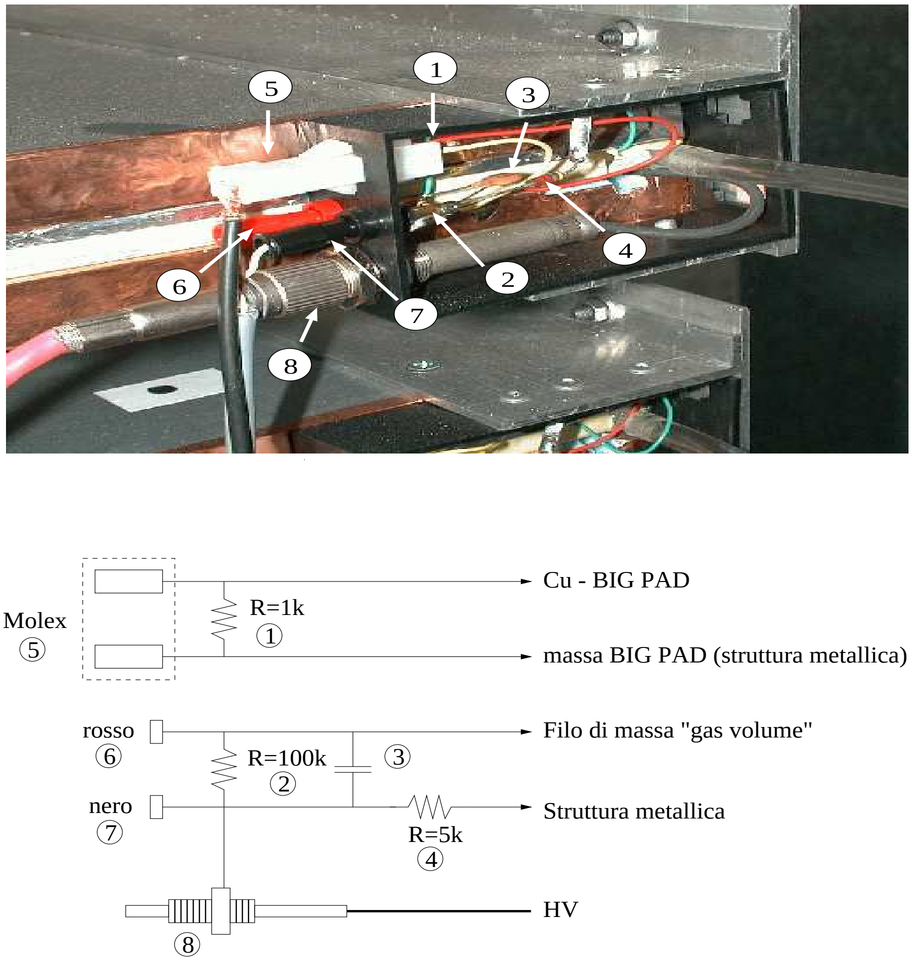


Figura 5.12: *Collegamenti del RPC di ARGO, lato HV. Sono visibili i connettori per la misura della corrente di camera (6 e 7) e per la lettura della forma d'onda della BIG PAD (5).*

tensione di soglia per l'innesco dei processi di streamer, la corrente all'interno della camera aumenta notevolmente a causa della carica da essi trasportata. Il progressivo incremento di corrente che si osserva nella figura è dovuto all'aumentare con la tensione del numero di processi di streamer che si innescano (in questo grafico non è visibile l'andamento ohmico). Si nota inoltre che le letture della corrente effettuate dall'alimentatore e ai capi dei 100 $k\Omega$ sono in perfetto accordo tra loro, e che i valori misurati (qualche μA a 10 kV di alimentazione) indicano un buon funzionamento delle camere.

Per determinare il punto di lavoro di un RPC, la prima operazione che si effettua è il conteggio, al variare della tensione, degli eventi rivelati in rapporto a quelli realmente passati. Per tensioni basse la camera non è ancora entrata nel regime di funzionamento e di conseguenza non si registrano conteggi al di fuori di quelli causati dal rumore.

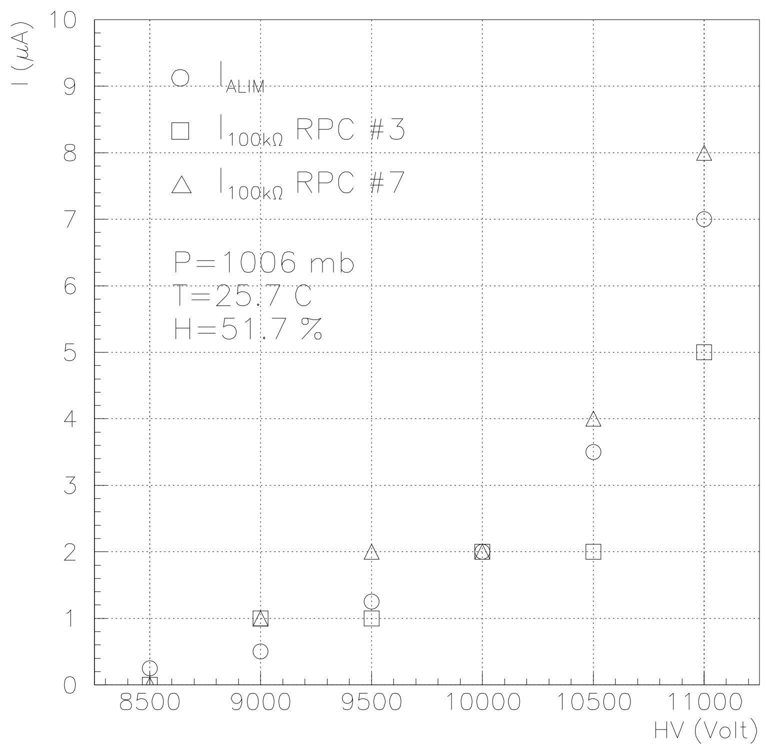


Figura 5.13: *Andamento della corrente nelle camere 10003 e 10007, letta dall'alimentatore e ai capi dei 100 $K\Omega$, infunzione di HV.*

Raggiunta la tensione di soglia iniziano a verificarsi gli eventi di streamer, i cui conteggi si sommano a quelli dovuti al rumore: la curva dei conteggi presenta quindi una rapida salita fino ad un valore di tensione a cui i conteggi si stabilizzano ("plateau"); a questo punto aumentando la tensione i conteggi variano di poco poiché gli eventi vengono rivelati nella loro totalità e le uniche variazioni sono dovute a fluttuazioni statistiche. Per questo motivo si sceglie un valore di tensione all'interno del plateau come punto di lavoro del RPC. Infatti scegliendo una tensione intorno al "ginocchio" (punto in cui i conteggi iniziano a stabilizzarsi) una qualsiasi misura sul rivelatore dipenderebbe enormemente dalla stabilità dell'alimentatore, dato che a piccole variazioni di tensione in questo punto corrispondono grosse variazioni di conteggi. Nel nostro caso la componente dei conteggi dovuta al rumore è stata eliminata richiedendo la coincidenza in tempo tra i conteggi di camera e quelli di uno scintillatore posto sopra. In figura 5.11 è mostrata la configurazione sperimentale usata per questa misura di conteggi. Sono stati contati gli eventi registrati in coincidenza tra scintillatore e BIG PAD della camera 10003 (coincidenze doppie) e quelli in coincidenza tra scintillatore, PAD 7 della camera 10007 (per la numerazione delle PAD vedi figura 3.5) e BIG PAD della camera 10003 (coincidenze triple) che si verificavano all'interno di un certo intervallo di tempo prefissato. Graficando il rapporto tripla/doppia si ottiene la curva di conteggi menzionata precedentemente. In figura 5.14 è riportata questa curva per la PAD 7 della camera 10007 in funzione dell'HV: la curva presenta un plateau ben definito con una tensione di ginocchio di $\sim 9000\ Volt$. Dall'analisi di questa curva si è scelto di effettuare misure di carica per HV = 10000 $Volt$.

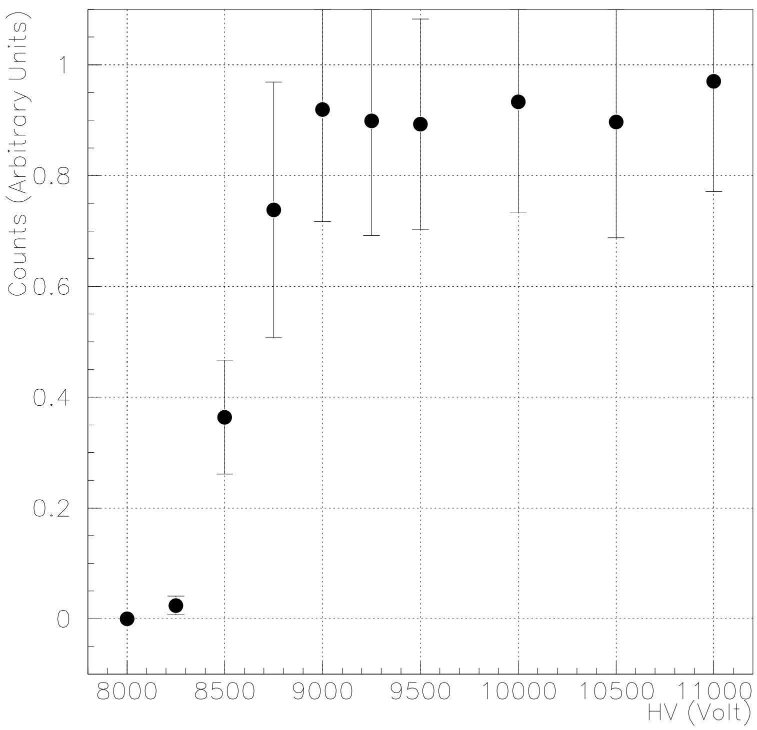


Figura 5.14: *Curva di conteggi di PAD di una delle camere in test (10007). Per maggiori spiegazioni vedi testo.*

Una misura dei conteggi in singola di tutte le PAD di un RPC permette di controllare il funzionamento delle schede di elettronica: è aspettata una frequenza di conteggio di $\sim 200\ Hz$ per ogni PAD, con una piccola dispersione dovuta esclusivamente a va-

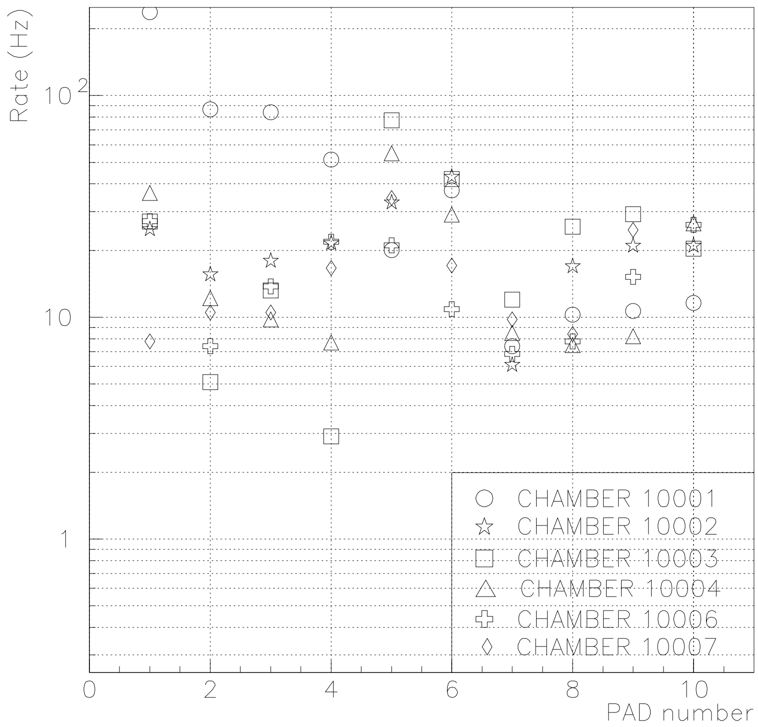


Figura 5.15: *Rate delle PAD di quattro camere diverse flussate con CO_2.*

riazioni statistiche. Nella figura 5.15 sono riportati i valori delle rate di ognuna delle 10 PAD delle camere provate, operanti con una miscela costituita da CO_2 puro. I valori ottenuti presentano una dispersione elevata, non prevista per il regime di funzionamento delle camere. Tale anomalia nella dispersione dei valori delle rate delle PAD è confermata dalle misure effettuate nelle camere 10002 e 10007 operanti con la miscela standard. I valori ottenuti, riportati in figura 5.16, confermano la dispersione anomala ottenuta in precedenza e mostrano un andamento in perfetto accordo con quello ottenuto operando le camere con CO_2. Infine in figura 5.17 è mostrata la distribuzione delle rate di PAD delle camere, operanti sia con la miscela standard che con CO_2, la quale evidenzia l'elevata dispersione sopra menzionata.

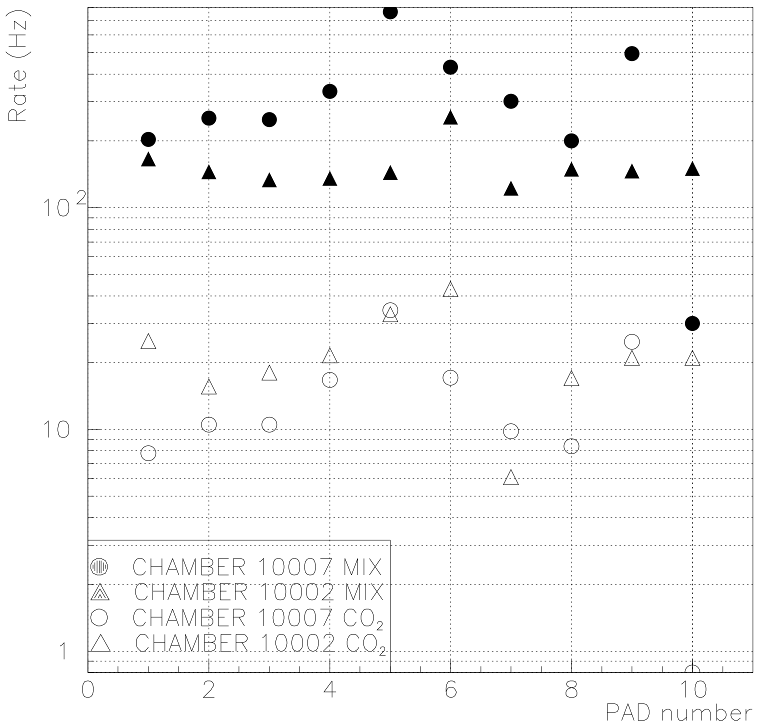


Figura 5.16: *Rate delle PAD di due camere diverse flussate sia con CO_2 che con la miscela standard di ARGO.*

5.2.4 Risultati delle misure di carica

I segnali analogici di BIG PAD sono stati acquisiti tramite l'oscilloscopio digitale, e analizzati in seguito presso i Laboratori di Roma Tre del gruppo ARGO. Nelle figure 5.22 e 5.23 sono riportati tipici segnali analogici di BIG PAD acquisiti per diversi valori di HV. Le forme d'onda ottenute dimostrano come il regime a cui operano gli RPC sia saturato; se così non fosse gli eventi non sarebbero tutti così simili, con distribuzione di tempi di discesa e spettri di carica molto piccati (vedi rispettivamente figure 5.20 e 5.24).

In figura 5.24 sono riportati gli spettri di carica di BIG PAD della camera 10007, relativi a differenti valori di HV, ottenuti dall'analisi dei segnali analogici acquisiti. Tutti gli spettri di carica presentano un picco di singolo streamer a $\sim 1\ nC$, mentre lo spettro ottenuto per HV = 11000 $Volt$ mostra altri picchi di carica dovuti alla presenza di

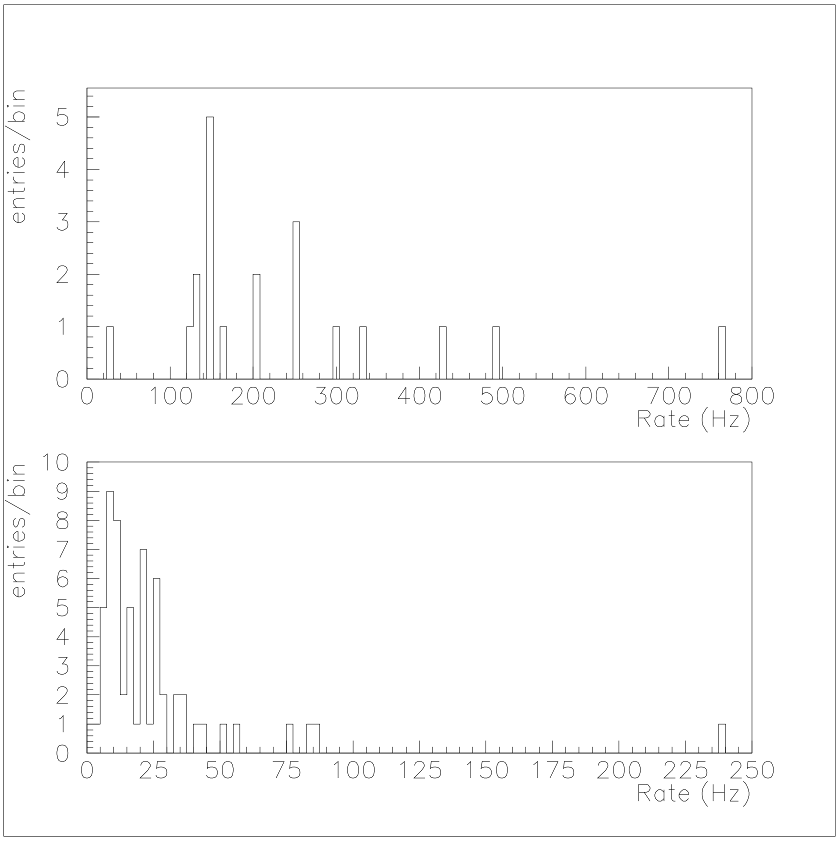


Figura 5.17: *Distribuzione delle rate di PAD per le camere 10002 e 10007 operanti con la miscela standard (plot sopra) e distribuzione delle rate per le camere 10001, 10002, 10003, 10004, 10006, 10007 operanti con CO_2 (plot sotto).*

eventi multi-streamer, eventi cioè in cui un elettrone del primo streamer sufficientemente energetico si è separato dalla valanga principale e ha dato vita ad altri streamer; la probabilità che si verifichino questi tipi di eventi è molto bassa ma aumenta con la tensione, e per questo motivo sono ben visibili solo a 11000 $Volt$.

Utilizzando gli spettri di carica mostrati in figura 5.24 è stato possibile ottenere l'andamento del primo picco e del valor medio di ogni spettro in funzione dell'alta tensione (vedi figura 5.18); il valor medio è stato calcolato applicando un taglio agli spettri di carica mostrati prima (il taglio è visibile in figura 5.24) per eliminare gli eventi di rumore: si è visto infatti che in ogni spettro tutti i valori di carica inferiori a 0.4 nC corrispondevano ad eventi di fondo. L'andamento quasi lineare ottenuto è spiegato dal regime di funzionamento saturato degli RPC di ARGO. Ipotizzando che il primo picco dia il valore della carica del singolo streamer, il modello di Korff [19] prevede per

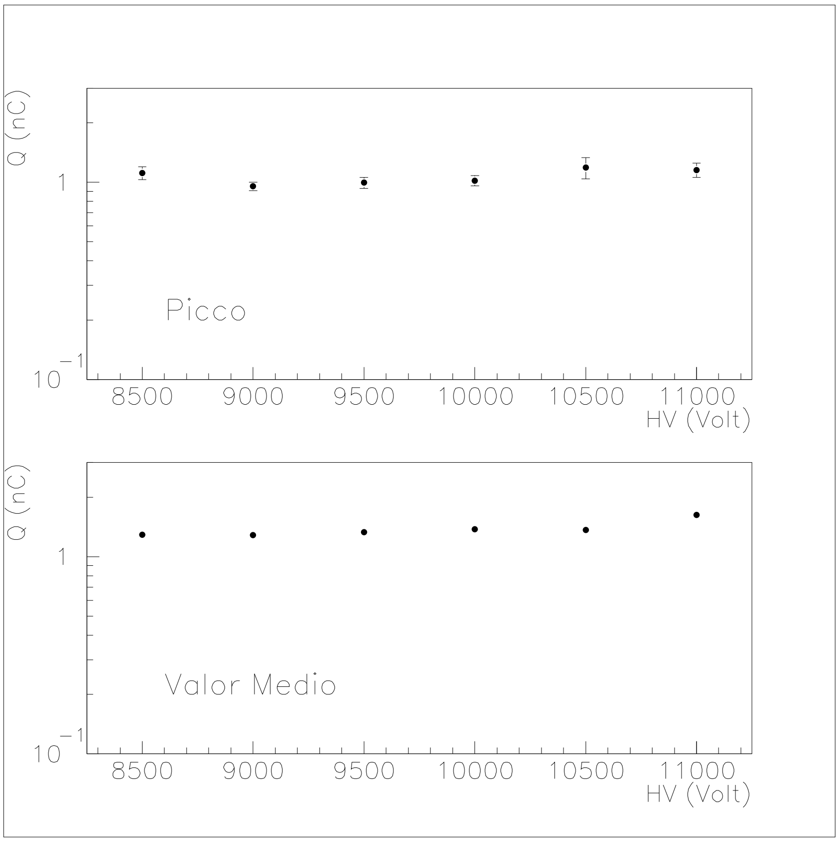


Figura 5.18: *Andamento del valor medio e del primo picco di ogni spettro di carica della figura 5.24.*

tale andamento:

$$Q = Ae^{kV}$$

dove k è un coefficiente che dipende dalla miscela utilizzata e dal regime di funzionamento della camera; il risultato del fit di $\ln Q$ verso V è riportato in tabella 5.4.

I dati acquisiti hanno permesso una misura del tempo di discesa τ del segnale della BIG PAD, la cui distribuzione è riportata in figura 5.20: il valor medio risulta essere 2.57 μs e la σ 0.39 μs. Il valor medio va confrontato con il valore di τ che si ottiene considerando la BIG PAD come un grosso condensatore il cui tempo di scarica è pari a R×C, dove R = 50 Ω è la resistenza di carico della BIG PAD e C è la sua capacità, il cui valore calcolato è dell'ordine di $\sim 176\ nF$. Il valore di C misurato con un capacimetro risulta invece dell'ordine di $\sim 60\ nF$; la discrepanza con il valore calcolato è dovuta alla distanza della BIG PAD dal piano di massa (cioè alla distanza tra le arma-

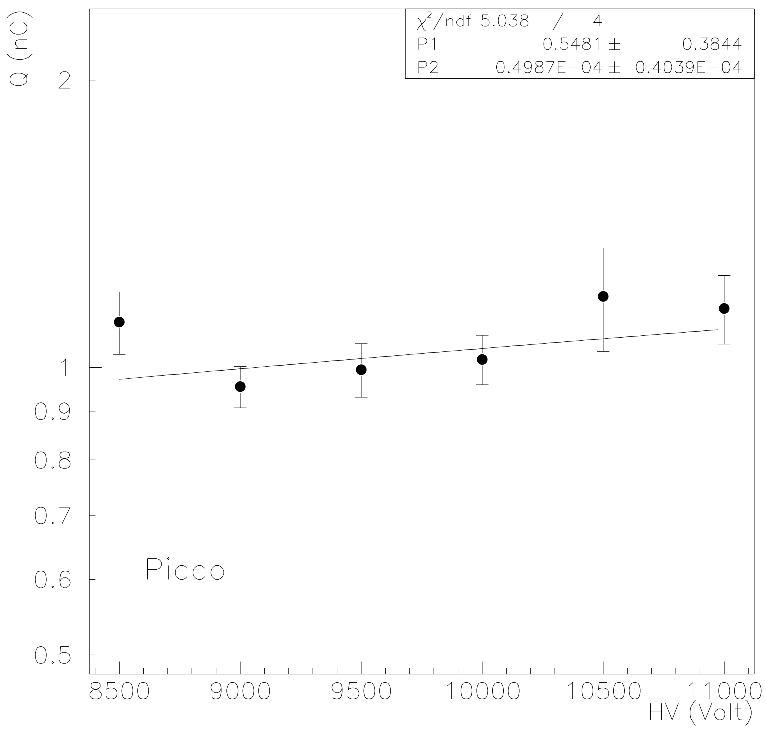


Figura 5.19: *Fit lineare ai valori del primo picco di ogni spettro di carica della figura 5.24.*

ture del condensatore), che non può essere considerata costante e uguale allo spessore del foglio di PET utilizzato come isolante ($200\ \mu m$). Il valore di τ stimato dal valore di C ottenuto con il capacimetro è di $\sim 3\ \mu s$, in accordo con il valore ottenuto dalle distribuzioni di carica.

$A \pm \sigma_A(nC)$	$k \pm \sigma_k(V^{-1})$	χ^2
0.548±0.384	(0.499±0.404)$\cdot 10^{-4}$	1.26

Tabella 5.4: *Risultato del fit di* $\ln Q$ *verso* V.

Per essere sicuri che le misure di carica, effettuate integrando il segnale, sono corrette, è stata calcolata la distribuzione della frazione di carica raccolta in funzione della durata del tempo di raccolta; infatti l'integrazione per un tempo troppo breve, effettuata per esempio da alcuni tipi di dispositivi che integrano il segnale per pochi mi-

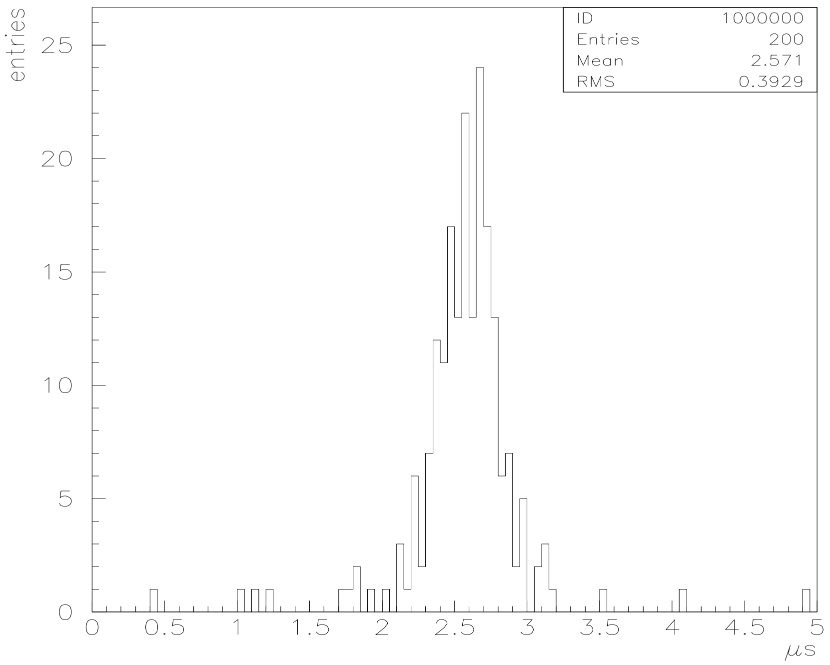


Figura 5.20: *Distribuzione del tempo di discesa dei segnali di BIG PAD acquisiti a 10 kV.*

crosecondi, comporta la perdita di importanti frazioni di carica. In figura 5.21 è riportata questa distribuzione: l'andamento mostra che per raccogliere il 90% della carica prodotta occorre integrare il segnale per un tempo di almeno 10 μs. Per effettuare le misure sopra descritte, il segnale analogico è stato integrato per tutta la sua durata, pari a 40 μs, permettendo quindi la raccolta di tutta la carica.

5.2.5 Conclusioni sui test degli RPC

Le misure effettuate presso la fabbrica sulle prime camere prodotte hanno evidenziato i seguenti punti:

i) Gli RPC hanno bisogno di un accurato condizionamento per poter funzionare correttamente.

ii) La corrente assorbita ha mostrato il comportamento previsto con dei valori ragionevoli evidenziando così l'assenza di difetti di costruzione nel "gas volume".

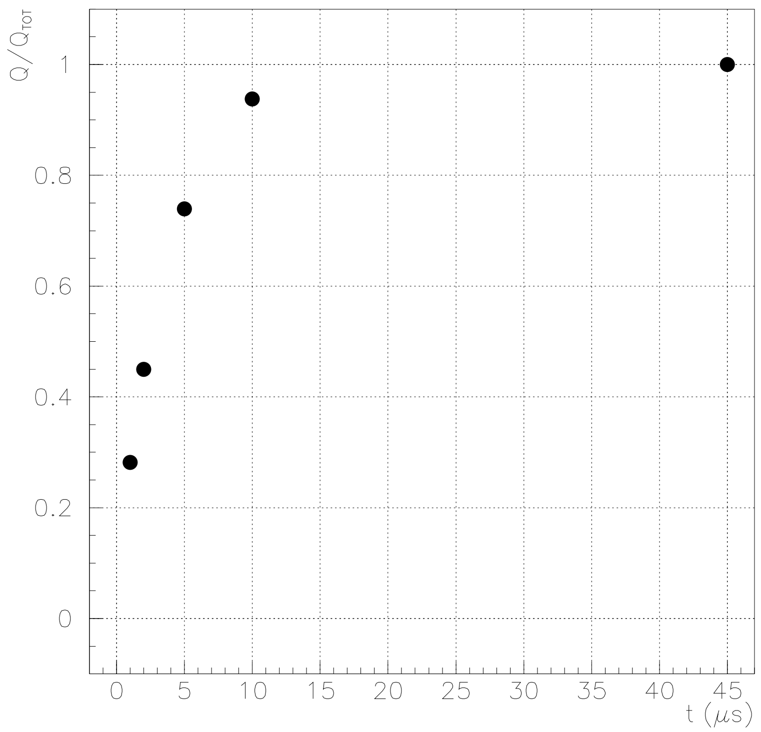


Figura 5.21: *Andamento della frazione di carica raccolta in funzione del tempo di integrazione.*

iii) I valori delle rate di PAD ottenuti mostrano una dispersione anomala la cui origine non è ancora chiara. Questa dispersione è stata riscontrata su tutte le camere testate, flussate sia con CO_2 che con la miscela standard.

iv) Graficando gli spettri di carica acquisiti a varie tensioni si è visto che la carica del singolo evento risulta essere $\sim 1nC$, maggiore di quanto sia mai stato misurato. Il motivo di questa diversità sta nel fatto che, al fine di studiare sciami di altissima energia, la collaborazione ARGO ha deciso di utilizzare elettrodi di lettura del segnale di dimensioni mai usate prima: in ogni RPC vi sono due grosse PAD di lettura (BIG PAD) aventi ciascuna una superficie di 1.75 m^2, la cui lettura viene effettuata analogicamente al fine di calcolare la carica indotta.

v) È stato confermato il modello di Korff che prevede una dipendenza esponenziale della carica del singolo streamer dall'alta tensione; sono stati inoltre calcolati i coefficienti di tale andamento per le cariche indotte sulla BIG PAD.

vi) Dalla misura del tempo di discesa del segnale di BIG PAD si è risaliti alla sua capacità ottenendo C $\sim 50\ nF$, diverso dal valore aspettato ($\simeq 176nF$). Questa differenza è dovuta alla pressione del box di contenimento non sufficiente a schiacciare completamente il foglio di materiale isolante, spesso 200 μm, presente tra la BIG PAD e il suo piano di massa: la distanza tra le armature risulta quindi maggiore di quella aspettata (200 μm). Questa intepretazione è confermata da una misura effettuata direttamente sulla BIG PAD con un capacimetro, la quale fornisce C $\simeq 60\ nF$.

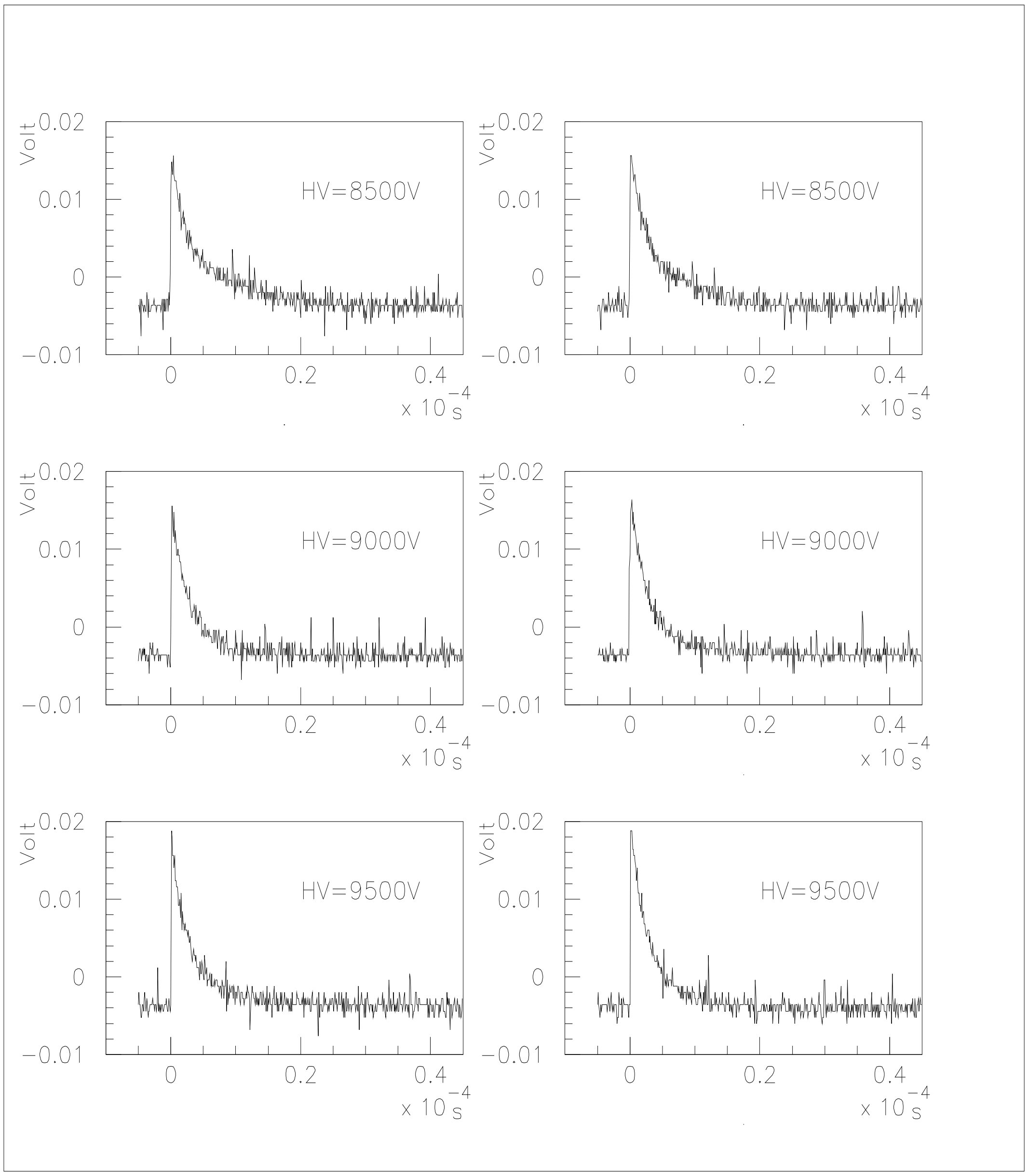


Figura 5.22: *Esempi di forme d'onda di BIG PAD a varie tensioni.*

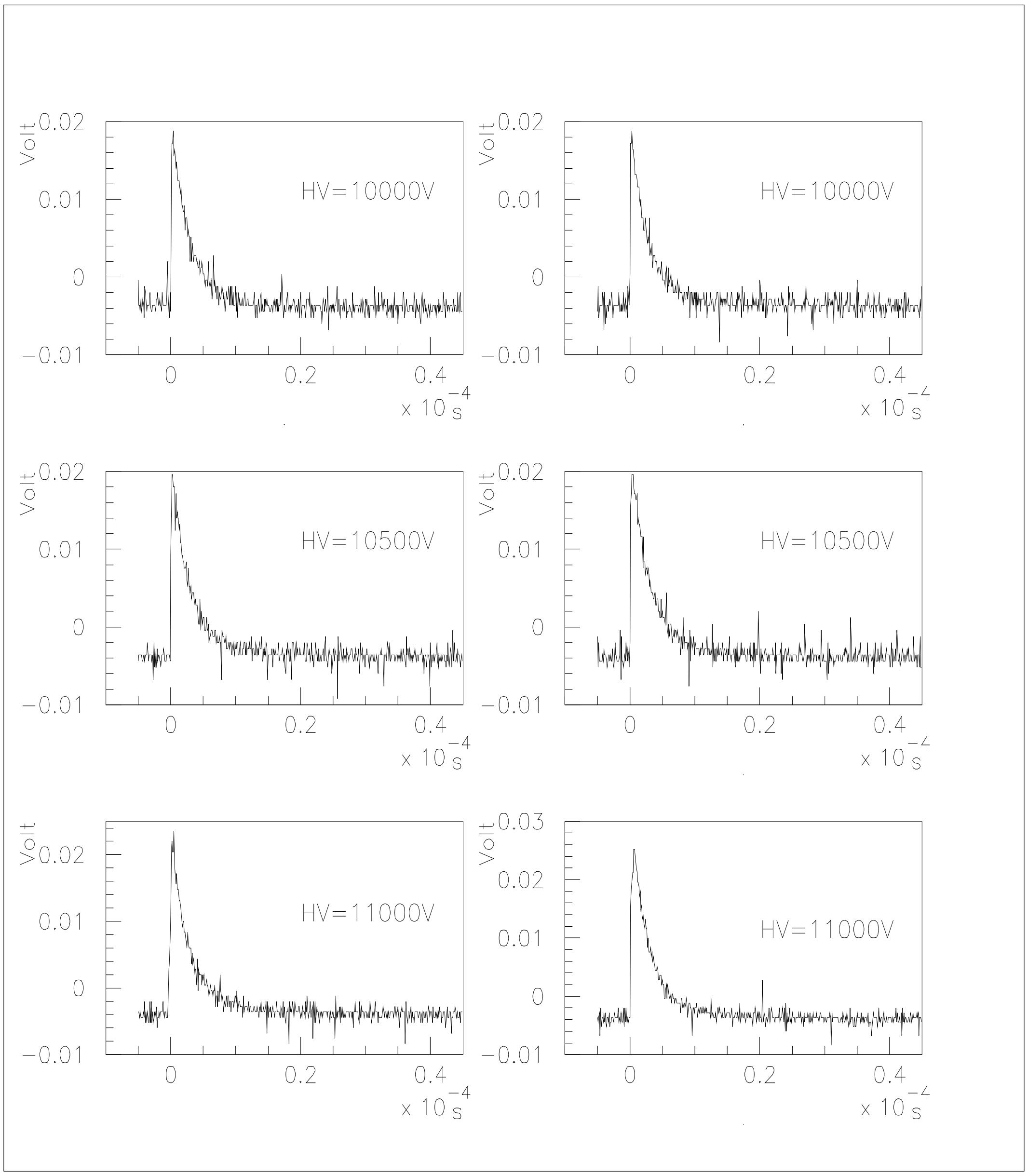


Figura 5.23: *Esempi di forme d'onda di BIG PAD a varie tensioni.*

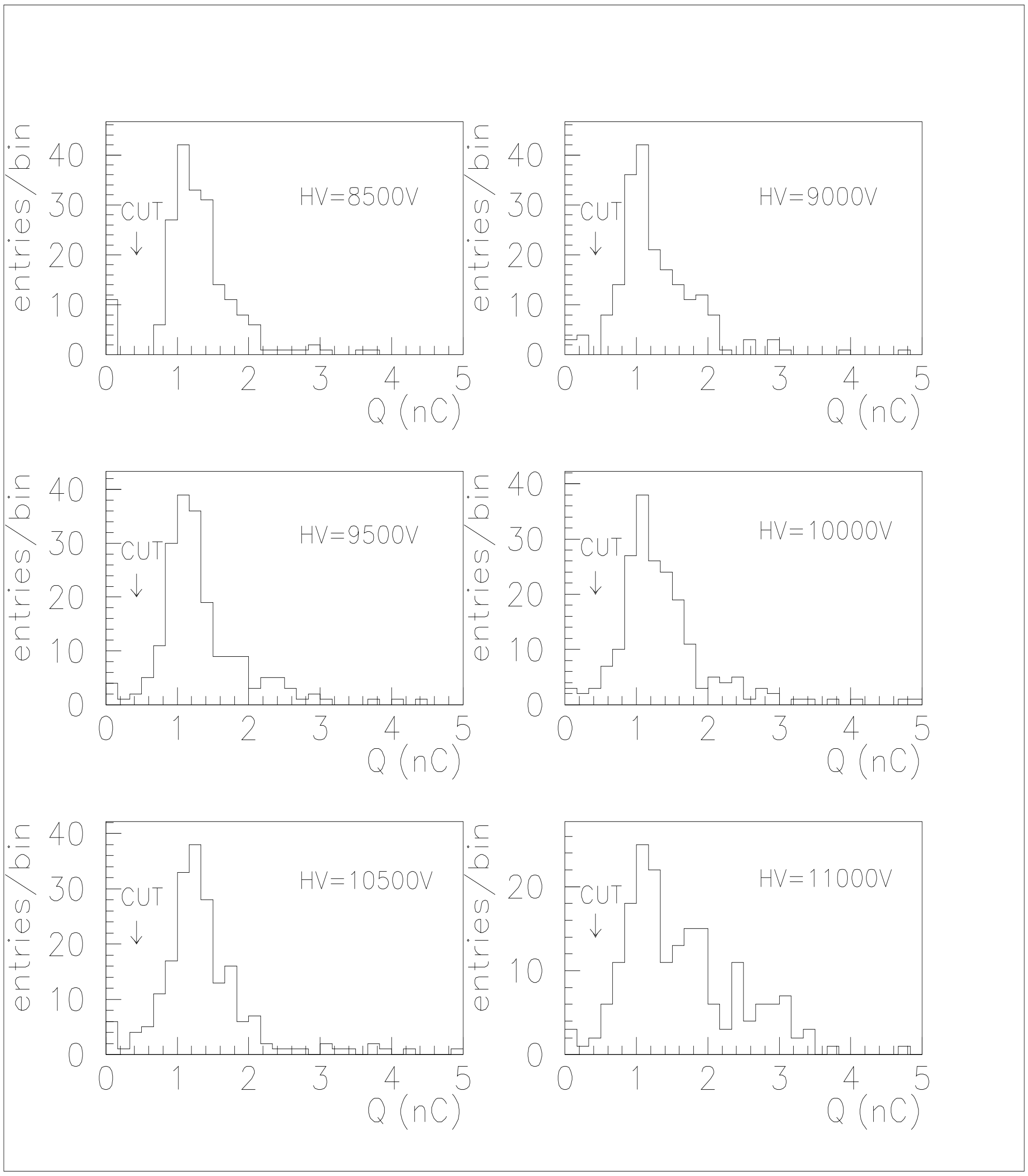


Figura 5.24: *Spettri di carica ottenuti dalla BIG PAD 1 della camera 10007.*

Conclusioni

Il lavoro descritto in questa tesi è stato svolto all'interno del gruppo ARGO-YBJ di Roma Tre. L'attività è consistita nello studio del comportamento elettrico e meccanico delle camere RPC costruite per l'esperimento. È stato studiato uno dei parametri importanti per il funzionamento degli RPC: l'uniformità della gap. La deformazione della gap è stata misurata per diversi valori della pressione esercitata sul piano di strip dal box di contenimento. Il fine di questa misura era quello di valutare l'efficacia di un'eventuale modifica alla struttura meccanica dell'RPC (l'utilizzo di spessori tra il piano di strip e il "gas volume") per limitare questa deformazione. Le misure effettuate sono riassunte nei seguenti punti:

i) In assenza del piano di strip non si è evidenziata alcuna deformazione, sia senza che con gli *spessori*. Nel lato a contatto con il piano centinato di Al gli *spessori* non hanno alcuna funzione.

ii) La pressione sul piano di strip deforma la gap del RPC sia con che senza gli *spessori*. La presenza degli *spessori* diminuisce la deformazione da $\sim 30\ \mu m$ a $\sim 20\ \mu m$ alla pressione prevista dalla meccanica di ARGO.

iii) La variazione del campo elettrico dentro la gap è $\sim 1\%$ sia con che senza gli *spessori*. Questa variazione risulta essere ininfluente sulla risoluzione temporale del RPC.

iv) È stato evidenziato un fenomeno di isteresi della bakelite, il cui contributo alla disomogeneità della gap è di circa 15 μm, confrontabile quindi con l'effetto degli *spessori* sulla variazione della gap.

Le misure compiute hanno mostrato che l'introduzione degli spessori effettivamente riduce la deformazione della gap. Nonostante questo il loro utilizzo non porta alcun vantaggio in quanto il campo elettrico nella gap non varia in maniera significativa in seguito alla loro introduzione e la corrispondente variazione di risoluzione temporale è trascurabile. Inoltre l'effetto di isteresi comporta una variazione non uniforme dello spessore della gap dovuta alla differente pressione usata per costruire la camera; poiché questo effetto è confrontabile con lo schiacciamento della gap, la misura di questa deformazione non può essere controllata al decimo di μm.

Al fine di realizzare una stazione di test in grado di effettuare misure per controllare la bontà di funzionamento delle camere sono stati sviluppati, tramite il linguaggio di programmazione grafico Labview, una serie di programmi per il controllo tramite computer degli strumenti di laboratorio necessari alla misura di parametri fondamentali degli RPC, quali la corrente che scorre nella camera e la frequenza di conteggio delle PAD, e all'analisi delle cariche indotte. Il sistema realizzato permette di effettuare in modo automatico anche il condizionamento delle camere, di grande importanza per gli RPC di ultima generazione.

Realizzata la stazione di test sono state eseguite una serie di misure sui primi RPC dell'esperimento ARGO che hanno evidenziato i seguenti punti:

i) Gli RPC hanno bisogno di un accurato condizionamento per poter funzionare correttamente. Per l'esperimento ARGO si è utilizzata un nuovo tipo di bakelite che consente di avere prestazioni migliori ma che necessita di un'accurata procedura di condizionamento.

ii) La corrente assorbita ha mostrato il comportamento aspettato evidenziando così l'assenza di difetti di progettazione e costruzione delle camere.

iii) I valori delle rate di PAD ottenuti mostrano una dispersione anomala la cui origine non è ancora chiara. Questa dispersione è stata riscontrata su tutte le camere testate.

iv) Al fine di studiare sciami di altissima energia, la collaborazione ARGO ha deciso di utilizzare elettrodi di lettura del segnale di dimensioni mai usate prima: in ogni RPC vi sono due grosse PAD di lettura (BIG PAD) aventi ciascuna una superficie di 1.75 m^2, la cui lettura viene effettuata analogicamente. La carica indotta dal processo di streamer su elettrodi di così grandi dimensioni è stata misurata per la prima volta ed è risultata dell'ordine di $\sim 1\ nC$.

Il test compiuto su un campione dei primi RPC prodotti per l'esperimento ARGO ha mostrato un complessivo buon funzionamento dei rivelatori e non ha evidenziato difetti nel processo di costruzione o di montaggio.

Appendice A

Programmi di acquisizione dati

A.1 CAEN N570

Il pannello di controllo dell'alimentatore di alta tensione, sviluppato tramite Labview, è stato strutturato in maniera tale da permettere cambiamenti delle impostazioni online; tutte le operazioni sono state quindi inserite all'interno di un loop continuo che attende un comando dall'utente e impedisce al programma di fermarsi una volta compiute tutte le operazioni richieste (vedi figura 4.2).

Ciascuna operazione consiste nel fornire al sottoprogramma "Send Command" (vedi A.1.1) il codice del comando corrispondente (disponibile sul manuale d'uso dell'alimentatore) e gli eventuali valori necessari; a seconda dell'operazione effettuata (scrittura o lettura) può essere necessario leggere la risposta dal modulo. Ad esempio, se si vuole conoscere lo status di entrambi i canali, si invia il codice "1", e in risposta si ha una matrice i cui primi due elementi rappresentano la tensione effettiva generata dal primo canale dell'alimentatore, il terzo e il quarto elemento danno la corrente che scorre nel primo canale, e così via. Nel caso in cui si abbia a che fare con parametri relativi ad un solo canale, si deve specificare il numero di canale quando si invia il codice del comando (per il secondo canale i codici presenti sul manuale vanno aumentati di 256).

Poiché la comunicazione tra il computer ed il modulo CAEN avviene sotto forma di numeri esadecimali, gli elementi della matrice fornita dal programma "Send Command" devono essere interpretati prima di poter essere letti dall'utente. Nel caso in cui si debba leggere un numero decimale, basta fare una semplice conversione (numero decimale = cifra esadecimale meno significativa + cifra più significativa $\times$ 256). Nel caso, invece, in cui si abbiano quei parametri che possono essere rappresentati con livelli logici (per esempio se un canale è acceso o spento, se sta salendo in tensione o scendendo, ecc.), ad ognuno degli 8 bit corrispondenti alle due cifre esadecimali della matrice vengono associati 8 di questi parametri. Per associare in maniera corretta i parametri dell'alimentatore che si vogliono leggere alle cifre esadecimali che si ottengono in risposta dallo strumento, sono state usate alcune tabelle presenti sul suo manuale d'uso. Nello stesso modo è possible inviare numeri decimali o parametri logici all'alimentatore

A.1.1 "Send Command"

In figura 4.1 è mostrato il programma che, tramite alcune librerie fornite dalla CAEN, permette la comunicazione tra il computer e l'alimentatore. Il primo passo consiste nell'inviare ad una periferica specificata dal "crate number" (numero che identifica il modulo CAEN con cui si vuole dialogare) un codice corrispondente al comando desiderato, che in alcuni casi richiede altri due parametri (ad esempio se si vuole impostare una tensione, bisogna mandare, oltre al codice, anche il valore della tensione): il numero da inviare "buffer" e il numero di cifre esadecimali da cui è costuito "count" (si ricordi che i numeri vengono inviati in formato esadecimale). Il secondo passo consiste nel leggere la risposta dell'alimentatore (nel caso in cui il comando la richieda) e inserirla in una matrice di numeri "buffer" di "count" cifre esadecimali.

A.2 TEKTRONIX TDS 540A

Il pannello di controllo dell'oscilloscopio, come quello dell'alimentatore di alta tensione, è stato strutturato in modo tale da poter cambiare le sue impostazioni senza essere costretti a far ripartire il programma ogni volta (vedi figura 4.4). Tutte le operazioni, effettuate tramite il programma "GPIB Write-Read" (vedi A.2.1), sono state quindi inserite all'interno di un loop continuo. Il programma può essere diviso concettualmente in due parti, una dedicata alle impostazioni dell'oscilloscopio, ed un'altra che compie l'acquisizione e l'eventuale scrittura su file delle forme d'onda.

L'impostazione dei parametri di funzionamento può essere effettuata in due modi diversi: *a)* agendo manualmente sul pannello ogni volta che venga richiesto, oppure *b)* leggendo i parametri di impostazione da un file precedentemente scritto.

a) Sono stati creati, nel pannello principale e nei pannelli di vari sottoprogrammi, una serie di controlli multiopzione che associano ad ogni comando eseguibile una stringa e la inviano all'oscilloscopio.

b) È possibile scrivere in un file di testo le stringhe di comando per poi farle leggere dal programma mediante una funzione di Labview che tira fuori le stringhe da un file e successivamente le invia all'oscilloscopio mediante "GPIB Write-Read". Questa procedura risulta comoda per un utente che non conosce l'esatto funzionamento del pannello di controllo. Possono essere scritti su file anche alcuni parametri che dovranno essere usati dal programma (come per esempio il numero di eventi da acquisire): in questo caso la stringa del file viene convertita nella variabile corrispondente (numero o altro) ed inviata all'operazione che la richiede.

La parte del programma relativa all'acquisizione della forma d'onda permette di scegliere se scriverla su file o meno. In ogni caso, non appena si verifica un trigger dell'oscilloscopio (condizione richiesta tramite un stringa di comando dedicata), avviene il campionamento delle forme d'onda presenti sui quattro canali (tramite "Read Waveform", vedi A.2.2) che successivamente vengono stampate su grafici presenti sul pannello. Nel caso in cui si decida di scrivere su file, prima di effettuare l'acquisizione viene creato il file con l'intestazione contenente i parametri dell'oscilloscopio (letti tramite "GPIB Write-Read"); successivamente le forme d'onda vengono lette e scritte su file, usando "Write 540" (vedi A.2.3), per un numero di volte fissato dall'utente. Terminate queste operazioni viene chiuso il file e il programma è pronto per una nuova acquisizione.

A.2.1 "GPIB Write-Read"

Questo programma si basa su una funzione di Labview che permette la comunicazione con il bus GPIB richiedendo unicamente l'indirizzo della periferica e i dati da trasferire sotto forma di stringa. Ad ogni operazione che può essere effettuata dall'oscilloscopio corrisponde una stringa di comando il cui elenco è presente sul manuale d'uso. La prima operazione che viene compiuta è quella di inviare la stringa "Characters to write" allo strumento specificato dall'indirizzo "GPIB address", fornendo in caso di errore il codice relativo in "Write status" (vedi figura 4.3); dopodiche viene letto un certo numero di caratteri "♯ of bytes to read" che vengono stampati in "Characters read", dando anche in questo caso la possibilità di risalire all'errore compiuto grazie a "Read status".

A.2.2 "Read Waveform"

Questo programma esegue il campionamento delle forma d'onda presenti sullo schermo dell'oscilloscopio. Per prima cosa si imposta quale porzione di schermo andare a campionare (si può scegliere se acquisire tutta la forma d'onda o solo una parte, delimitata da due valori temporali fissati dall'utente); successivamente si passa all'acquisizione, effettuata tramite una serie di funzioni di Labview prese da un programma simile, che crea due matrici (tensione e tempo) in cui ogni elemento corrisponde ad un campionamento. Viene inoltre stampata su grafico la forma d'onda letta.

A.2.3 "Write 540"

Questo programma è simile a quelli usati nel sistema di acquisizione finale per la scrittura su file (vedi A.4.1). L'unica differenza è dovuta al fatto che, poiché i dati arrivano sotto forma di matrice (4 delle tensioni ed una dei tempi), vanno trattati in modo da ottenere un file in uscita scritto sotto forma di tabella (vedi figura 4.7); infatti se questo non venisse fatto, il file in uscita sarebbe composto da una lunga colonna di numeri con poco senso. Per ottenere la tabella viene scritto su file il valore di ogni matrice corrispondente ad un certo campionamento; dopodiche si passa ai valori corrispondenti al campionamento successivo scrivendoli nella riga successiva del file e così via.

Anche in questo file è presente un'intestazione fornita dal programma principale; a questa viene però aggiunta la carica di ogni forma d'onda calcolata tramite "Charge Waveform" (A.2.4).

A.2.4 "Charge Waveform"

Esegue un algoritmo che calcola l'integrale del segnale ($Q = \int V dt$), tenendo conto di un eventuale "offset". Per prima cosa viene calcolato l'offset come tensione media dei campionamenti della forma d'onda precedenti il trigger; questo viene successivamente inserito nel calcolo dell'integrale. Il numero cosi' ottenuto viene poi trasformato in nC.

A.3 NATIONAL INSTRUMENTS SCB-68

A.3.1 "Acquire 4 Current" & "Acquire PTHT"

I programmi sviluppati per l'acquisizione della corrente di camera, letta ai capi dei 100 kΩ (vedi paragrafo 4.2), e dei parametri ambientali sono stati strutturati allo stesso modo poiché entrambi fanno uso di un sottoprogramma, scritto dalla National Instruments, che permette la lettura della tensione sui canali analogici della scheda di acquisizione. L'unica modifica richiesta a questo sottoprogramma è costituita dalle conversioni necessarie per ottenere i parametri voluti (vedi paragrafo 4.2.2).

A.3.2 "Event Counter"

Il programma "Event Counter" usa alcuni sottoprogrammi scritti dalla National Instruments per l'utilizzo dei contatori presenti sulla scheda; le modifiche fatte consistono nel permettere di contare contemporaneamente i segnali sui due contatori (duplicando i sottoprogrammi) per un tempo impostato dall'utente: questo è fatto inserendo tra la start e lo stop del contatore una funzione di attesa il cui tempo è fissato all'avvio del programma. Inoltre, per essere sicuri che il tempo impostato sia stato rispettato, sono state inserite prima e dopo il conteggio delle funzioni che scrivono su stringa la data e l'ora del computer, dando così l'ora di inizio e fine conteggio.

A.4 Programma finale di acquisizione "Test"

Questo programma è stato usato sia per il condizionamento degli RPC che per l'acquisizione dei parametri; di conseguenza la prima operazione effettuata consiste nel leggere i valori della tensione di alimentazione della camera, che per comodità sono stati scritti su un file di testo ("hv"), a cui dovrà essere portato l'RPC per effettuare il condizionamento (vedi paragrafo 5.2.1) o l'acquisizione.

Nel caso in cui si voglia condizionare l'RPC, viene compiuta successivamente l'accensione della camera e la variazione della tensione (usando il sottoprogramma"Send Command", vedi A.1.1) secondo i valori letti dal file "hv" , monitorando continuamente la corrente di camera e la tensione generata dall'alimentatore.

Nel caso invece in cui si vogliano misurare i parametri menzionati nel capitolo 4 vengono compiute altre operazioni. Una volta accesa la camera, viene creato il file, con relativa intestazione (sotto forma di stringa), su cui verranno scritti i parametri (vedi figura 4.9) e comincia una procedura iterativa in cui per ogni valore di tensione viene effettuata l'acquisizione dei dati. Per prima cosa viene impostata la tensione in base ai valori del file "hv", aspettando cinque minuti per dare tempo alla camera di assestarsi; durante questa attesa viene monitorata la corrente di camera. Successivamente vengono letti *i)* i parametri ambientali (vedi A.3.1), *ii)* alcuni valori dell'alimentatore (tensione effettiva generata, corrente nel canale usato e tensione impostata sono letti mediante "Send Command", A.1.1), *iii)* le correnti di camera, ai capi dei 100 $k\Omega$, di quattro diversi RPC (A.3.1) ed infine vengono calcolate le frequenze di conteggio di due PAD (A.3.2). A questo punto avviene la lettura delle forme d'onda e si può scegliere tra due possibilità:

a) scrivere le forme d'onda su file insieme alla carica di ogni impulso. Questo viene effettuato usando il pannello di controllo dell'oscilloscopio (vedi A.2).

b) calcolare soltanto la carica di ogni impulso rivelato. In questo caso sono state usate solo alcune parti del pannello di controllo dell'oscilloscopio: dopo che si è verificato un evento di trigger vengono lette le forme d'onda dei quattro canali ("Read Waveform", vedi A.2.2) e ne vengono calcolate le cariche mediante "Charge Waveform" (vedi A.2.4).

Una volta calcolate le cariche di tutti gli eventi richiesti si può scegliere se scriverle su di un file specifico (vedi figura 4.8) mediante la funzione "Write Q" (vedi A.4.1); in ogni caso ne viene calcolato il valor medio e la σ che vengono inseriti, mediante "Write Test" (vedi A.4.1), in un file insieme a tutti i parametri dell'acquisizione (vedi figura 4.9).

Dopo aver scritto i parametri sul file, ricomincia la procedura di acquisizione, variando però la tensione (si passa al valore successivo del file scritto dall'utente). Una volta terminato il programma viene spento l'RPC.

A.4.1 "Write Q" & "Write Test"

Entrambi questi programmi si basano su una funzione di Labview che permette di scrivere su file una stringa; di conseguenza è sufficiente convertire in stringhe tutte le variabili che devono essere registrate. Per creare un file comprensibile sia al programma di analisi PAW che all'utente, si è scelto di inserire tra una variabile e la successiva uno spazio vuoto.

Appendice B

Programmi di analisi dati

Di seguito è riportato il listato dei programmi usati per analizzare i dati la cui acquisizione è descritta nel capitolo 4. Al fine di semplificarne la lettura da parte del programma di analisi, i programmi di Labview sono stati strutturati in maniera tale che la forma in cui vengono scritti i dati sia comprensibile a PAW. Ciononostante è stato necessario "filtrarli" ulteriormente per eliminare sia alcuni caratteri sconosciuti a PAW che tutti i dati non necessari nell'analisi. Per eseguire questa pulizia sono stati usati diversi programmi scritti in linguaggio C, di cui viene riportato un esempio:

```
//
// This program takes as input a datafile formatted as shown
// below and creates a new datafile where only the time and
// voltage values of the chosen event are shown.
// The program accepts as parameters the input file name
// (default is "data.dat") and the output file name (default is
// "getwave540charge.dat") and number of the event to process
// (default is one).
//
// Input file formatting:
//
//  Header
//
//  EVENT = 1 - day - time
//  Q(CH1)=...  -  Q(CH2)=...  -  Q(CH3)=...  -  Q(CH4)=...
// -5.00000E-8  0.00000E+0  -8.12500E-3  7.93750E-3  0.00000E+0
// -4.90000E-8  0.00000E+0  -1.05000E-2  1.04370E-2  0.00000E+0
// -4.80000E-8  0.00000E+0  -8.12500E-3  7.93750E-3  0.00000E+0
// -4.70000E-8  0.00000E+0  -2.25000E-3  1.87500E-3  0.00000E+0
//  .
//  .
//  .
```

```
// 4.47000E-7  0.00000E+0  -1.18125E-2  9.75000E-3  0.00000E+0
// 4.48000E-7  0.00000E+0  -1.61250E-2  7.93750E-3  0.00000E+0
// 4.49000E-7  0.00000E+0  -8.18750E-3  7.62500E-3  0.00000E+0
//  EVENT = 2 - day - time
//  Q(CH1)=...  -  Q(CH2)=...  -  Q(CH3)=...  -  Q(CH4)=...
// -5.00000E-8  0.00000E+0  -8.12500E-3  7.93750E-3  0.00000E+0
//   .
//   .
//   .
//
// The five columns represent respectively:time,CH1 value (in
// V),CH2 value,CH3 value,CH4 value.
//

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "ana.h"

main(int argc,char *argv[])
{
  char junk[1000], good[1000];
  int eventn = 0;
  int chan,goodev,event;
  int npoints=0;
  int j,i,k;
  float charge[4] = 0;
  float Q[4] = 0;
  float v[4],t;
  float ch[4][7];
  float timearray[20000],voltarray[4][20000];
  FILE *filein;
  FILE *fileout;

  switch(argc)
    {
//
// Use default input and output data files and see event #1
// or...
//
    case 1:
      filein = fopen("data.dat","r");
      fileout = fopen("getwave540charge.dat","w");
```

```
      event = 1;
      beak;
//
// ...read the input filename from the command line and see
// event #1 or...
//
    case 2:
      filein = fopen(argv[1],"r");
      fileout = fopen("getwave540charge.dat","w");
      event = 1;
      break;
//
// ...read the input and output filenames and event number
// from the command line.
//
    default:
      filein = fopen(argv[1],"r");
      fileout = fopen(argv[2],"w");
      event = atoi(argv[3]);
      break;
    }

//
// Search for the desired event
//

  for(;;)
    {
      while(strcmp(junk,"EVENT"))
{
  fscanf(filein,"%s",junk);
}
      fscanf(filein,"%s",junk);
      fscanf(filein,"%d",&eventn);
      printf("%d\n",eventn);
      if(event == eventn){break;}
    }

  printf("Event found\n");

//
// Throw " - date time" away
```

```
//

  fscanf(filein,"%s",junk);
  fscanf(filein,"%s",junk);
  fscanf(filein,"%s",junk);

//
// Read the charges computed by Labview and throws "NaN"
// (empty channels) away
//

  for(k=0;k<4;k++)
    {
      fscanf(filein,"%s",junk);

      if(junk[7]!='N')
{
  for(j=0;j<1000;j++)
    {
      good[j] = junk[j+7];
    }
  Q[k] = atof(good);
}

      if(k<3)
{
  fscanf(filein,"%s",junk);
}
    }
//
// Read desired data from the datafile and store it in memory
//

  for(;;)
    {
      fscanf(filein,"%s",junk);

      if (strcmp(junk,"EVENT")==0 || feof(filein))
{
  break;
}
      t = atof(junk);
```

```
      fscanf(filein,"%e",&v[0]);
      fscanf(filein,"%e",&v[1]);
      fscanf(filein,"%e",&v[2]);
      fscanf(filein,"%e",&v[3]);
      timearray[npoints]=t;
      voltarray[0][npoints]=v[0];
      voltarray[1][npoints]=v[1];
      voltarray[2][npoints]=v[2];
      voltarray[3][npoints]=v[3];
      npoints++;
     }

//
// Perform some analysis
//

  for(chan=0;chan<4;chan++)
{
  ch[chan][0]=findmax(voltarray[chan],npoints);
         ch[chan][1]=findtime(timearray,voltarray[chan],
                                    npoints,ch[chan][0]);
  ch[chan][2]=findoffset
    (timearray,voltarray[chan],npoints,9);
  printf("Offset on channel %d is %f mV\n",chan,
                                            ch[chan][3]);
  ch[chan][3]=integrate_with_offset
    (voltarray[chan],npoints/(50/7),ch[chan][2])*2;
  ch[chan][4]=integrate_with_offset
    (voltarray[chan],npoints/5,ch[chan][2])*2;
  ch[chan][5]=integrate_with_offset
    (voltarray[chan],npoints/(50/15),ch[chan][2])*2;
  ch[chan][6]=integrate_with_offset
    (voltarray[chan],npoints,ch[chan][2])*2;
}

//
// Write useful data to output file.
//

 for (i=0;i<npoints;i++)
    {
      fprintf(fileout,"%e %e %e %e %e %e %e %e %e %e %e %e %e\n",
```

```
       timearray[i],voltarray[0][i],voltarray[1][i],
voltarray[2][i],voltarray[3][i],ch[0][4],ch[1][4],
         ch[2][4],ch[3][4],ch[1][3],ch[1][4],ch[1][5],ch[1][6]);
    }

//
// Close files.
//

  fclose(filein);
  fclose(fileout);
}
```

Una volta "ripuliti", dei tre tipi di file di dati (vedi capitolo 4), quello contenete le forme d'onda lette dall'oscilloscopio è stato sottoposto ad un ulteriore passaggio: tramite gli algoritmi elencati di seguito, è stato possibile ricavare da questo file tutti i parametri richiesti, come per esempio la carica del segnale (ottenute integrando l'impulso)

```
// This simple collection of functions has been written to
// perform analysis on impulsive waveforms acquired from digital
// oscilloscopes via a GPIB data bus and stored as ASCII files.
//
// float findmax(float *volt, int datalen)
//
// float findmin(float *volt, int datalen)
//
// float findabsmax(float *volt, int datalen)
//
// float integrate(float *volt, int datalen)
//
// int findindex (float *volt, int datalen, float ref)
//
// float findtime(float *time, float *volt, int datalen,
//                                                  float ref)
//
// float findbeforemax(float *time, float *volt, int datalen,
// float ref, float max)
//
// float findaftermax(float *time, float *volt, int datalen,
//                       float ref, float max)
//
// float risetime(float *time, float *volt, int datalen,
```

```
//                  float max)
//
// float width(float *time, float *volt, int datalen,
//                  float ref, float max)
//
// float findoffset(float *time, float *volt, int datalen,
//                                              float triggerpos)
//
// float integrate_with_offset(float *volt, int datalen,
//                                                  float offset)
//
////////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the maximum value of a waveform of 'datalen' points.
// Waveform data is passed via the 'volt' vector.
//

float findmax(float *volt, int datalen)
{
 float max = volt[0];
 int i;

 for (i=0;i<datalen;i++)
  {
    max = (max > volt[i]) ? max : volt[i];
  }

 return max;
}

////////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the minimum value of a waveform of 'datalen' points.
// Waveform data is passed via the 'volt' vector.
//

float findmin(float *volt, int datalen)
{
 float min = volt[0];
 int i;

 for (i=0;i<datalen;i++)
  {
    min = (min < volt[i]) ? min : volt[i];
```

```
  }

 return min;
}

///////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the absolute maximum value of a waveform of
// 'datalen' points. Waveform data is passed via the 'volt'
// vector.
//

float findabsmax(float *volt,int datalen)
{
 float max = volt[0];
 float min = volt[0];
 int i;

 for (i=0;i<datalen;i++)
  {
    max = (max > volt[i]) ? max : volt[i];
    min = (min < volt[i]) ? min : volt[i];
  }

 max = (max > (min*-1)) ? max : min;
 return max;
}

///////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the index at which a generic 'ref' value of a
// waveform of 'datalen' points is found for the first time.
// Waveform data is passed via the 'volt' vector.
//

int findindex (float *volt, int datalen, float ref)
{
 int i;

 for(i=1;i<datalen;i++)
  {
   if (((volt[i-1] <= ref) && (volt[i] >= ref)) ||
        ((volt[i-1] >= ref) && (volt[i] <= ref)))
    {break;}
```

```
  }

 if (i == datalen)
  {
   printf("==> could not find requested point\n");
   return 0;
  }

 if (volt[i] == volt[i-1])
  {
   printf("==> Warning, two digitizations at same value\n");
  }

 return i-1;
}

///////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the index at which the maximum ('max') value of a
// waveform of 'datalen' points is found. Waveform data is
// passed via the 'volt' vector.
//

int findmaxindex (float *volt, int datalen, float max)
{
 int index = 0;
 int i;

 for(i=0;i<datalen;i++)
  {
   if (volt[i] == max)
    {
     index = i;
     break;
    }
  }

 return index;
}

///////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the time at which a generic 'ref' value of a
// waveform of 'datalen' points is found. Waveform data is
```

```
// passed via the 'volt' vector, timing data is passed via the
// 'time' vector.
//

float findtime(float *time, float *volt, int datalen,
                                                    float ref)
{
 float tpos;
 int i;

 for(i=1;i<datalen;i++)
  {
   if (((volt[i-1] <= ref) && (volt[i] >= ref)) ||
((volt[i-1] >= ref) && (volt[i] <= ref)))
     {
      break;
     }
  }

 if (i == datalen)
  {
   printf("==> could not find requested point\n");
   return 0;
  }

 if (volt[i] == volt[i-1])
  {
   tpos=time[i-1]+((time[i]-time[i-1])/2);
   printf("==> Warning, two digitizations at same value\n");
  }

 if (volt[i] != volt[i-1])
  {
   tpos = time[i]-((volt[i]-ref)*(time[i]-time[i-1])/
                                         (volt[i]-volt[i-1]));
  }

 return tpos;
}

////////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the time at which a generic 'ref' value of a
```

```
// waveform of 'datalen' points is found before the maximum
// ('max') of the waveform itself. Waveform data is passed via
// the 'volt' vector, timing data is passed via the 'time'
// vector.
//

float findbeforemax(float *time, float *volt, int datalen,
    float ref, float max)
{
  int startindex = findmaxindex(volt,datalen,max);
  int err = 0;
  float time0 = time[startindex];
  float tpos=0;
  int i=0;

  for(i=startindex;i>0;i--)
    {
      if (((volt[i-1] <= ref) && (volt[i] >= ref)) ||
  ((volt[i-1] >= ref) && (volt[i] <= ref)))
{break;}
    }

  if (volt[i] == volt[i-1])
    {
      tpos=time[i-1]+((time[i]-time[i-1])/2);
      printf("==> Warning, two digitizations at same value\n");
    }
  else if (volt[i] != volt[i-1])
    {
      tpos = time[i]-((volt[i]-ref)*(time[i]-time[i-1])/
                                       (volt[i]-volt[i-1]));
    }
  else
    {
      tpos = 0;
      printf("==> could not find requested point\n");
    }

  return tpos;
}

////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
// Returns the time at which a generic 'ref' value of a
// waveform of 'datalen' points is found after the maximum
// ('max') of the waveform itself. Waveform data is passed via
// the 'volt' vector, timing data is passed via the 'time'
// vector.
//

float findaftermax(float *time, float *volt, int datalen,
                     float ref, float max)
{
 int startindex = findmaxindex(volt,datalen,max);
 int err = 0;
 float time0 = time[startindex];
 float tpos;
 int i;

 for(i=startindex;i<datalen;i++)
  {
   if (((time[i] - time0) > 200e-9))
   {
     err = 1;
     break;
   }

   if (((volt[i-1] <= ref) && (volt[i] >= ref)) ||
      ((volt[i-1] >= ref) && (volt[i] <= ref)))
    {
     break;
    }
  }

 if ((err != 0) || (i == datalen)) {return 0;}

 if (volt[i] == volt[i-1])
  {
   tpos=time[i-1]+((time[i]-time[i-1])/2);
   printf("==> Warning, two digitizations at same value\n");
  }

 if (volt[i] != volt[i-1])
  {
   tpos = time[i]-((volt[i]-ref)*(time[i]-time[i-1])/
```

```
                                                    (volt[i]-volt[i-1]));
    }

  return tpos;
}

////////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the integral of the values of the 'volt' vector for
// a waveform of 'datalen' points. Must be scaled to the bin
// width.
//

float integrate(float *volt, int datalen)
{
  float charge = 0;
   int i;

  for(i=0;i<datalen;i++)
    {
     charge += volt[i];
    }

  if (charge < 0)
    {
     charge = -(charge);
    }

  return charge;
}

////////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the integral of the values of the 'volt' vector for
// a waveform of 'datalen' points shifted by an 'offset' value.
// Must be scaled to the bin width.
//

float integrate_with_offset(float *volt, int datalen,
                                                    float offset)
{
  float charge = 0;
  int i;
```

```
 for(i=0;i<datalen;i++)
  {
   charge += volt[i]-offset;
  }

 if (charge < 0)
  {
   charge = -(charge);
  }

 return charge;
}

///////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the risetime (10% to 90% of the 'max' value) of a
// pulse of 'datalen' points. Waveform data is passed via the
// 'volt' vector, timing data is passed via the 'time' vector.
//

float risetime(float *time, float *volt, int datalen,
                                                    float max)
{
 float at90 = findbeforemax(time,volt,datalen,max*0.9,max);
 float at10 = findbeforemax(time,volt,datalen,max*0.1,max);

 if ((at90 == 0) || (at10 == 0)) {return 0;}

 return (at90-at10);
}

///////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the width of a pulse of 'datalen' points at a 'ref'
// level, making sure that the 'max' level of the pulse stays
// inside the width interval. Waveform data is passed via the
// 'volt' vector, timing data is passed via the 'time' vector.
//

float width(float *time, float *volt, int datalen,
                 float ref, float max)
{
 float from = findbeforemax(time,volt,datalen,ref,max);
 float to   = findaftermax(time,volt,datalen,ref,max);
```

```
 if ((from == 0) || (to == 0)) {return 0;}

 return (to - from);
}

///////////////////////////////////////////////////////////////
// Returns the DC offset of a waveform of 'datalen' points.
// The offset is computed on the mean value of the points
// before the trigger. Waveform data is passed via the 'volt'
// vector, timing data (for historical reasons, it is not
// really used) is passed via the 'time' vector.
//

float findoffset(float *time, float *volt, int datalen,
                                             float triggerpos)
{
  int i;
  int nsamples;
  float mean=0;

  nsamples = (int)((datalen*triggerpos)/100);

  for(i=0;i<nsamples;i++)
    {
      mean += volt[i];
    }

  return mean/nsamples;
}

///////////////////////////////////////////////////////////////
```

Elenco delle figure

Elenco delle tabelle

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il professor Mario De Vincenzi per il prezioso aiuto fornito nello sviluppo e nella presentazione di questo lavoro di tesi. Nonostante i numerosi impegni con il dipartimento, gli esperimenti e le varie commissioni, è riuscito a trovare il tempo per infondermi le conoscenze e la passione nella fisica sperimentale delle particelle elementari.

Desidero inoltre ringraziare il dottor Stefano Mari e Stefano Stalio per l'aiuto teorico e tecnico fornitomi nello svolgimento della tesi, e Gabriele Pellizzoni che con la sua (quasi) costante presenza ha evitato il sorgere di problemi di ogni tipo.

Un ringraziamento va anche a tutti coloro hanno sopportato i miei continui lamenti e mi hanno aiutato con validi consigli: Andrea, Elisabetta, Raffaele, Raffaella, Severino, Valentina.

Bibliografia

[1] Cronin J.W., *Rev. of Modern Physics* **71** (1999) No. 2.

[2] Hillas A. M. et al., *Astrophysical Journal* **503** (1998) 744.

[3] De Jager O. C. & Harding A. K., *Astrophysical Journal* **396** (1992) 161.

[4] Aharonian F., Drury L. & Volk H., *Astronomy and Astrophysics* **285** (1994) 645.

[5] Naito T. & Takahara, *Astrophysical Journal* **G20** (1994) 477.

[6] Quinn J. et al., *Astrophysical Journal* **456**, L83 (1996).

[7] Aharonian F. A. et al., *Astronomy and Asrophysics* **327**, L5 (1997).

[8] Salomon M. H. e Stecker F. W., *Apj* **493** (1998) 547.

[9] Djorgovski S. G. et al., *GCN Circular* **289** (1999).

[10] Stecker F. e Wolfendale A., *Nature* **309** (1984) 37.

[11] Bacci C. et al., *Addendum to the ARGO Proposal* (1998).

[12] Mari S. M. et al. 26^{th} *ICRC Proc* (1999).

[13] Abbrescia M. et al., *Proposal of the ARGO experiment* (1996).

[14] Honda M. et al., *Phys. Rev.* **D52** (1995) 4985.

[15] Dingus B. L., Catelli J. R. & Schneid E. J., 25^{th} *ICRC Proc* **3** (1997) 30.

[16] Bacci C. et al., Accettato da *Nuclear Instruments and Methods* (Settembre 1999).

[17] Brun R., *PAW User Guide, Program Library Q121*, CERN (1989).

[18] Gruppo ARGO - Roma 2, Comunicazione interna (2000).

[19] Sauli F., *Priciples of operation of multiwire proportional and drift chambers* (1977).