



INFN/AE-01/03

6th April 2001

Il programma AirWatch ed il progetto EUSO

O. Catalano^(a), G. D'Ali Staiti^(a), S. Giarrusso^(a), G. La Rosa^(a), M. C. Maccarone^(a),
B. Sacco^(a), L. Scarsi^(a), F. Becattini^(b), S. Bottai^(b), A. Cartacci^(b), D. Guetta^(b),
G. Landi^(b), P. Mazzinghi^(b), E. Pace^(b), M. Romoli^(b), M. Salvati^(b), P. Sona^(b),
P. Spillantini^(b), P. L. Tasselli^(b), B. Tiribilli^(b), G. Toci^(b), S. Cuneo^(c), D. De Marco^(c),
F. Fontanelli^(c), F. Gatti^(c), V. Gracco^(c), P. Musico^(c), M. Pallavicini^(c), A. Petrolini^(*,c),
M. Sannino^(c), G. Testera^(c), M. Aglietta^(d), G. Badino^(d), P. Galeotti^(d), P. Vallania^(d),
G. Giannini^(e), A. Gregorio^(e) e R. Stalio^(e).

^(a) *INFN, Sezione di Catania*

^(b) *INFN, Sezione di Firenze*

^(c) *INFN, Sezione di Genova*

^(d) *INFN, Sezione di Torino*

^(e) *INFN, Sezione di Trieste*

Abstract

Il programma AirWatch riguarda l'osservazione dallo spazio degli sciami estesi di particelle prodotti nell'atmosfera da particelle cosmiche di altissima energia. Nell'ambito di tale programma si colloca il progetto EUSO, recentemente sottoposto all'ESA da una collaborazione internazionale. In questa nota si descrivono la problematica scientifica connessa con i raggi cosmici di altissima energia, le problematiche tecniche legate all'osservazione dallo spazio degli sciami atmosferici estesi e si descrivono le linee di una possibile partecipazione dell'INFN al programma AirWatch ed al progetto EUSO in particolare.

(*) Corresponding author. e-mail: Alessandro.Petrolini@ge.infn.it

*Published by SIS-Pubblicazioni
Laboratori Nazionali di Frascati*

Contents

1	Descrizione della ricerca	1
1.1	Caratteristiche generali	2
1.2	Lo spettro alle altissime energie	3
1.3	Origine dei raggi cosmici di altissima energia	6
1.4	I neutrini di altissima energia	8
1.5	Altri obiettivi scientifici	10
1.6	Il metodo di rivelazione	10
2	L'apparato Sperimentale	13
2.1	Generalità	13
2.2	Sistema Ottico	15
2.3	Il fotorivelatore	17
2.3.1	Specifiche dei sensori	19
2.3.2	Il collettore di luce	21
2.4	Ingegnerizzazione della superficie focale	24
2.4.1	Struttura della superficie focale	24
2.4.2	Integrazione del sensore	24
2.4.3	Organizzazione della superficie focale	25
2.5	Elettronica	27
2.5.1	Elettronica di front-end	27
2.5.2	Elettronica di trigger e sistema di acquisizione dati	29
2.5.3	Elettronica di controllo	30
2.6	Il background	31
2.7	Calibrazioni	31
2.8	La missione	31
3	Il Programma	32
3.1	Obiettivi	33
3.2	Sviluppo temporale	34
3.3	Competenze	34
3.4	Il Programma di Ricerca	35
3.4.1	Il sensore (MAPMT)	35
3.4.2	Integrazione del sensore e ingegnerizzazione del fotorivelatore	37
3.4.3	L'elettronica di front-end	38
3.4.4	Il sistema di raccolta della luce sul sensore	38
3.4.5	I prototipi	39
3.4.6	Simulazioni e analisi dei dati	39
3.5	Richiesta di finanziamento all'INFN	40

4	Il progetto EUSO	41
4.1	Collaborazioni	41
4.2	Finanziamenti	41

1 Descrizione della ricerca

L'esistenza di raggi cosmici con energia $E \gtrsim 10^{20}$ eV rappresenta un dato sperimentale di enorme importanza ed estremamente difficile da spiegare in base alle conoscenze attuali sull'origine e sulla propagazione dei raggi cosmici nonché alla luce delle nostre conoscenze attuali sulle interazioni fondamentali.

Nell'arco degli ultimi quattro decenni sono stati osservati 13 eventi con energia $E \gtrsim 10^{20}$ eV da parte di cinque distinti esperimenti: Volcano Ranch (uno) [1], Haverah Park (quattro) [2], Yakutsk (uno) [3], Fly's Eye (uno) [4], Agasa (sei) [5]. Altri sette eventi sono stati osservati ed analizzati recentemente da HiRes [6]. Sulla base di queste osservazioni il flusso stimato di raggi cosmici con energia $E > 10^{20}$ eV è di circa un evento $\text{km}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{secolo}^{-1}$. Attualmente la massima energia misurata è di $\simeq 3 \cdot 10^{20}$ eV [4].

Se l'esistenza di eventi con tali energie è ormai un fatto assodato, quasi nulla è conosciuto sulla loro natura, sull'andamento dello spettro energetico nonché sui meccanismi di produzione di tali oggetti.

A tutt'oggi non si è potuto stabilire nessuna chiara correlazione con specifiche direzioni di provenienza di tali oggetti, la cui origine è quasi certamente extra-galattica, come varie considerazioni fanno supporre. Se si tratta di particelle convenzionali (con l'esclusione dei neutrini) le perdite di energie che tali particelle subiscono durante la propagazione fanno sì che la distanza di origine non possa essere molto più grande di un centinaio di Mpc. Di conseguenza a tali energie i campi magnetici galattici ed extra-galattici non influenzano apprezzabilmente le direzioni di protoni e nuclei, le quali dovrebbero quindi puntare alle sorgenti di emissione, se discrete. I raggi cosmici di altissima energia osservati sono consistenti con una distribuzione isotropica delle sorgenti, nell'ambito della limitata statistica disponibile. Questo è in contrasto con la distribuzione fortemente anisotropa delle sorgenti luminose presenti entro un raggio di circa 100 Mpc dalla Terra. Inoltre i modelli proposti per spiegare l'origine dei raggi cosmici di altissima energia tramite meccanismi convenzionali spiegano con una certa difficoltà come accelerare particelle a queste energie e come estrarre le particelle dalla zona di accelerazione senza che perdano l'energia ottenuta.

È anche possibile che questi problemi interpretativi siano indicazione del fatto che i raggi cosmici di altissima energia coinvolgano della nuova fisica.

È quindi ovvia l'importanza di un esperimento che sia in grado misurare particelle di altissima energia e di fornire una buona statistica ($\approx 10^3 \div 10^4$ eventi) con buona risoluzione angolare ed energetica in tempi ragionevoli (2 ÷ 3 anni).

Inoltre ci si aspetta, come previsto dalla maggior parte dei modelli, che nei raggi

cosmici sia anche presente una componente di neutrini, e non è per altro escluso che i primari osservati siano, almeno in parte, dei neutrini. I neutrini interagiscono debolmente (lunghezze di interazione dell'ordine della decina di Gpc) e per di più non sono influenzati dai campi magnetici galattici, ragion per cui forniscono senza ambiguità alcuna la direzione della sorgente. È quindi altrettanto ovvio l'interesse scientifico di poter rivelare anche neutrini di altissima energia.

In questa sezione viene riportato un breve riassunto della problematica scientifica connessa con i raggi cosmici di altissima energia, con particolare riferimento al programma AirWatch [11]. Descrizioni molto più approfondite si trovano in alcuni eccellenti articoli di rassegna recenti [12–15].

1.1 Caratteristiche generali

Il bassissimo flusso dei raggi cosmici di altissima energia richiede un rivelatore con enorme massa e volume sensibile. È significativo il fatto che, malgrado il grosso sforzo fatto durante gli ultimi quattro decenni, siano stati finora osservati solo una ventina di eventi da parte di esperimenti a Terra. Un modo di aggirare la difficoltà è usare una più grande frazione dell'atmosfera terrestre come rivelatore. Un osservatore nello spazio, ad un'altezza di circa 500 km da Terra, che la osservi dall'alto, può osservare una superficie fino $\approx 2 \cdot 10^7$ km², e quindi un bersaglio fino a $\approx 2 \cdot 10^{14}$ tonnellate di aria, che costituisce un rivelatore calorimetrico ideale per rivelare raggi cosmici di altissima energia, neutrini inclusi.

La particella primaria (nucleone, nucleo, fotone o neutrino di altissima energia) penetrando nell'atmosfera interagisce con le molecole atmosferiche, e i secondari prodotti subiscono a loro volta altre collisioni, dando così origine ad uno sciame atmosferico esteso (EAS, *Extensive Air Shower*). La maggior parte delle particelle cariche prodotte durante lo sviluppo dello sciame sono elettroni e il loro numero nel punto di massimo sviluppo dello sciame è proporzionale all'energia della particella primaria. Le particelle dello sciame muovendosi attraverso l'atmosfera ionizzano ed eccitano livelli metastabili degli atomi e delle molecole (principalmente delle molecole di N₂, che ne costituiscono la frazione maggiore) e la loro diseccitazione produce l'emissione di fotoni in tempi molto brevi (dell'ordine dei 5 ns). Lo spettro di fluorescenza presenta dei picchi di intensità nella regione 330 ÷ 400 nm, la luce emessa è isotropica, l'intensità proporzionale in ogni punto lungo lo sciame al numero di particelle cariche e l'intensità totale è proporzionale all'energia dello sciame.

Osservando la luce di fluorescenza del N₂, un EAS di alta energia appare quindi come un disco luminoso che si sposta, all'incirca alla velocità della luce, lungo la trai-

ettoria dello sciame, lunga qualche decina di km (a seconda della natura, dell'angolo d'incidenza e dell'energia del primario). L'intensità luminosa del disco è inizialmente debole, aumenta progressivamente di intensità fino a raggiungere un massimo per poi decrescere nuovamente fino a sparire, eventualmente raggiungendo la Terra. L'intensità luminosa osservata in corrispondenza di ciascuna quota della traiettoria è proporzionale allo sviluppo dello sciame a tale quota. L'integrale della intensità osservata ed anche l'intensità al suo massimo sono proporzionali all'energia del primario. La forma dello sciame e la posizione del massimo in funzione della profondità di penetrazione dipendono dalla natura del primario. Particelle differenti danno luogo a sciame che si sviluppano in modo diverso. Sciame originati da neutrini si sviluppano a maggiori profondità nell'atmosfera rispetto a quelli generati da adroni e fotoni, dato che la sezione d'urto neutrino-nucleo è alcuni ordini di grandezza più piccola della sezione d'urto adrone-nucleo o fotone-nucleo.

La tecnica basata sull'osservazione della luce di fluorescenza è stata utilizzata con successo in passato dall'esperimento Fly's Eye [16] ed è attualmente usata dall'esperimento HiRes [17]. Essa è ormai una tecnica assodata e ben compresa e sarà usata anche nell'esperimento Auger [18]. L'osservazione dalla luce di fluorescenza da parte di un osservatorio nello spazio non presenta quindi problemi di principio. L'esperimento ha inoltre il vantaggio di permettere non solo la rivelazione di EAS generati da raggi cosmici, ma anche di osservare altri fenomeni quali fenomeni celesti transienti nel vicino UV e fenomeni atmosferici (vedi la proposta [19] allegata).

1.2 Lo spettro alle altissime energie

Più di tre decenni sono trascorsi dall'osservazione del primo evento con energia superiore a 10^{20} eV a Volcano Ranch. Attualmente, sulla base della ventina di eventi globalmente osservati, sembra escluso che lo spettro energetico dei raggi cosmici per energie superiori a 10^{19} eV (la regione detta comunemente della "caviglia" o "ankle") sia una semplice estrapolazione dello spettro valido al di sotto di tale energia. I dati sperimentali sembrano indicare l'esistenza di un nuovo meccanismo che incomincia ad emergere dalla coda di una distribuzione spettrale che decresce molto rapidamente come illustrato nelle figure 1 e 2 (da [12]).

Poco dopo la scoperta della radiazione cosmica di fondo (*Cosmic Microwave Background radiation*, CMB) da parte di Penzias e Wilson nel 1965, Greisen ed indipendentemente Zatsepin e Kuzmin [20], hanno sottolineato il fatto che l'esistenza della CMB rende l'universo opaco a tutte le particelle standard note (eccetto i neutrini) di energia sufficientemente elevata.

Per i protoni, ad esempio, ciò avviene allorché viene raggiunta la soglia di fotopro-

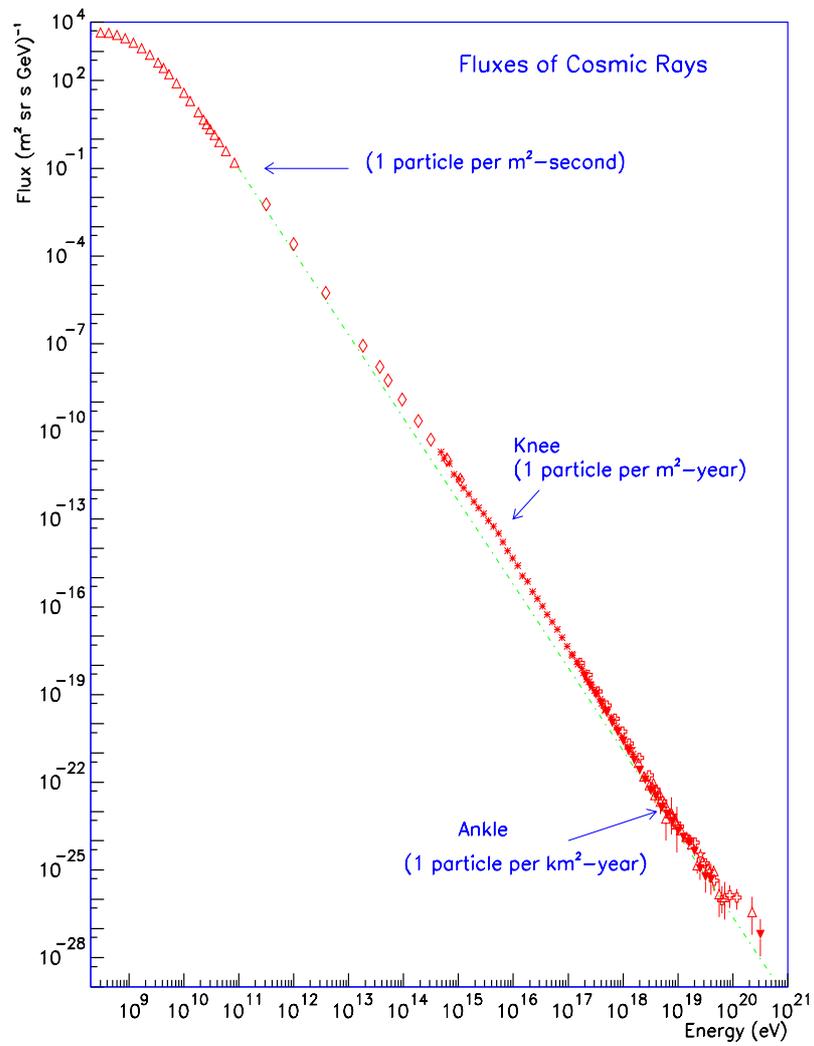


Figure 1: Lo spettro integrale dei raggi cosmici osservati.

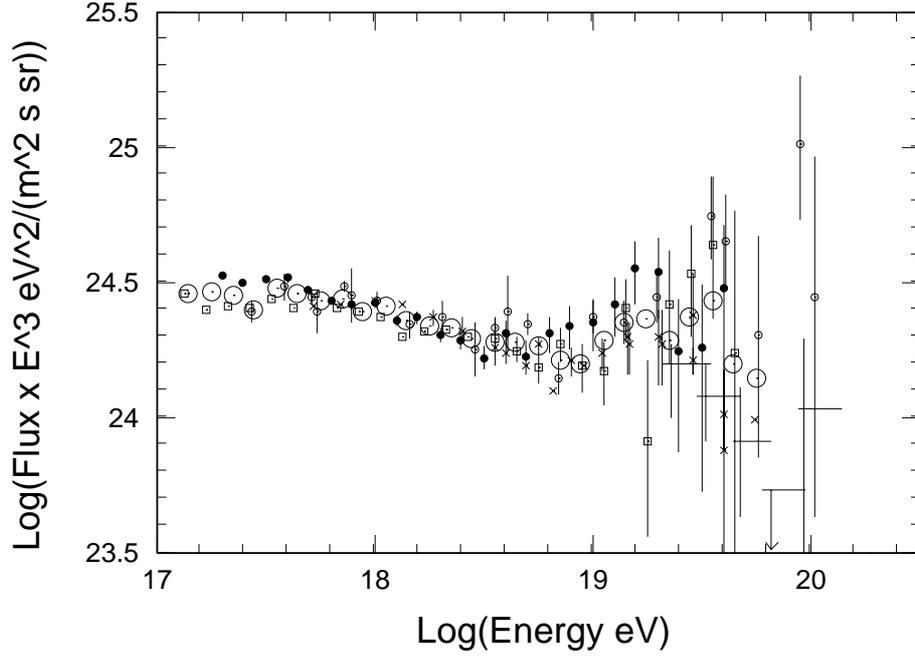


Figure 2: Lo spettro integrale dei raggi cosmici osservati alle altissime energie.

duzione di pioni, $E \approx 7 \cdot 10^{19}$ eV l'energia di taglio di Greisen, Zatsepin e Kuzmin (GZK). La reazione $\gamma p \rightarrow \Delta^+ \rightarrow N\pi$ ha l'effetto di degradare rapidamente l'energia del protone incidente producendo una lunghezza di attenuazione dell'ordine di 50 Mpc per un protone di 10^{20} eV. È importante osservare come la perdita di energia sia graduale e risulti da molte collisioni in cui il protone perde una frazione della propria energia. La figura 3 mostra chiaramente come un protone degradi la sua energia, in funzione dell'energia iniziale e della distanza percorsa.

A queste energie il decadimento β è la principale fonte di perdita di neutroni, con una lunghezza di propagazione di circa un Mpc per un neutrone di 10^{20} eV.

I nuclei, ad energie $E \gtrsim 10^{19}$ eV, subiscono la fotodisintegrazione a causa dell'interazione col fondo infrarosso [22] (IRB) e con il CMB, e l'energia del nucleone più energetico fra quelli sopravvissuti è drasticamente degradata su distanze dell'ordine della decina di Mpc.

Le lunghezze di attenuazione, alle altissime energie, dei fotoni sono dell'ordine della decina di Mpc [23], a causa della produzione di coppie e^+e^- sui fotoni del background cosmico.

Si può quindi concludere che, quale che sia la natura del raggio cosmico rivelato, neutrini esclusi, almeno per interazioni conformi al Modello Standard, se esso ha energia superiore a $\approx 10^{20}$ eV non può provenire da distanze molto maggiori di $50 \div 100$ Mpc.

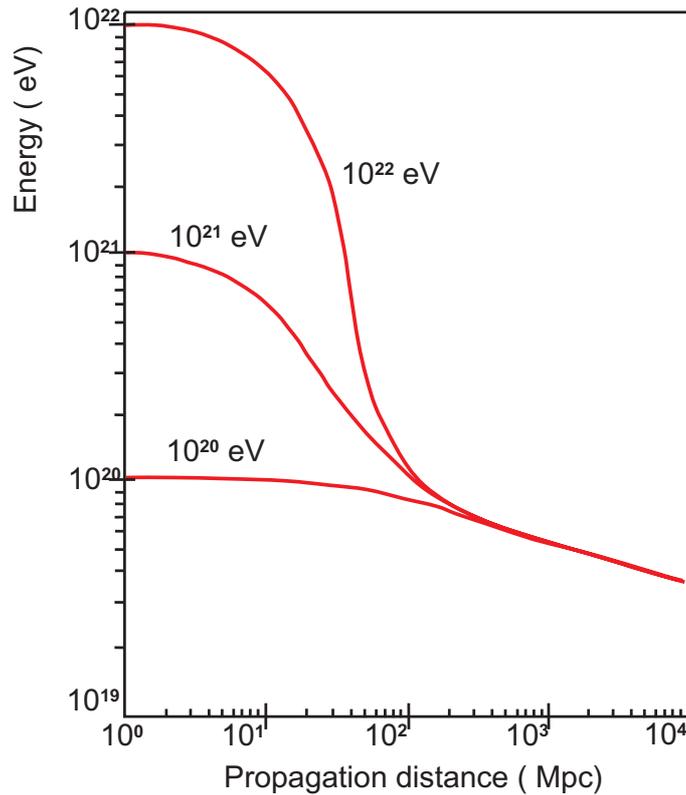


Figure 3: Distanza di propagazione di un protone in funzione della sua energia.

Questa distanza è grosso modo la dimensione del cluster Virgo, al quale appartiene la nostra galassia.

Comunque nella regione di energia corrispondente all'energia di taglio di GZK non è necessariamente visibile un taglio netto in quanto ci può essere anche il contributo di sorgenti vicine e di neutrini cosmici. Ci si aspetta comunque un effetto di addensamento intorno alle energie vicine e al di sotto della soglia GZK.

1.3 Origine dei raggi cosmici di altissima energia

Svariati modelli sono stati proposti per spiegare l'origine degli eventi di altissima energia. I meccanismi che sono stati invocati o proposti rientrano in due grandi classi: meccanismi di accelerazione ("Bottom-Up") e meccanismi di decadimento ("Top-Bottom").

- I meccanismi di accelerazione convenzionali rientrano a loro volta in due categorie.
 - Accelerazione diretta da parte di campi elettrici estremamente intensi. Ciò può avvenire in prossimità di oggetti molto compatti, come stelle di neutroni forte-

mente magnetizzate, o in dischi di accrescimento di buchi neri. Questi meccanismi anche se capaci di generare l'energia voluta non producono però distribuzioni con andamento di legge di potenza.

- Accelerazione stocastica alla Fermi (di primo o secondo tipo).

Indipendentemente dai dettagli del meccanismo di accelerazione la massima energia ottenibile da una particella di carica Ze è data da $E \lesssim ZeLB$ [21], dove B è il campo magnetico nella zona di accelerazione le cui dimensioni lineari sono L . Tale relazione impone severe condizioni sulle possibili sorgenti che si riducono essenzialmente alle stelle di neutroni, agli Active Galactic Nuclei (AGN) e alle radiogalassie del tipo Fanaroff-Riley-II. Tuttavia un numero molto limitato di oggetti di questo tipo sembra esistere a distanze inferiori al centinaio di M_{pc} , ed in nessun caso è stato possibile identificare in maniera certa alcuno di questi come una reale candidata sorgente.

Questa categoria di meccanismi ha in generale difficoltà nello spiegare la generazione di energie così elevate e anche, una volta generate, a spiegare come tali energie non si degradino drasticamente nel processo di estrazione della particella dalla zona di accelerazione. Inoltre i modelli proposti fanno generalmente ricorso a parametri limite per gli oggetti astrofisici considerati come ipotetiche sorgenti.

- Decadimenti di oggetti esotici: decadimenti di particelle super pesanti, instabili o metastabili, genericamente designate come particelle- X . Il decadimento dell' X produce, fra gli altri, quarks e leptoni. I quarks adronizzano e unitamente ai decadimenti dei leptoni instabili si ha come risultato una cascata di fotoni, neutrini, leptoni leggeri e nucleoni. Una parte di queste particelle costituiscono i raggi cosmici di altissima energia che arrivano alla Terra.

A loro volta i meccanismi di produzione delle X proposti rientrano in due classi.

- Interazioni o decadimenti di difetti topologici (TD) che producono X che decadono immediatamente. I TD sono stati prodotti durante la transizione di fase che ha rotto la simmetria della GUT. È un modello molto speculativo dato anche che si sa veramente molto poco su tale transizione di fase. Il flusso di cosmici associato dipende dalla densità dei TD e dalla loro vita media.
- Particelle pesanti metastabili associate ad un campo primordiale prodotte dopo la fase di inflazione dell'Universo e sopravvissute. Le vite medie devono quindi essere dell'ordine di grandezza dell'età dell'Universo. Il flusso di cosmici dipende dalla densità di tali oggetti.

Naturalmente occorre che:

- i prodotti di decadimento dell' X abbiano viaggiato (neutrini esclusi) meno di ≈ 100 Mpc;
- la massa dell' X sia molto maggiore dell'energia più elevata osservata (qualche 10^{20} eV, a tutt'oggi il che è per altro compatibile con le scale dei modelli GUT ($10^{24} \div 10^{25}$ eV));
- la densità delle X e la loro vita media siano compatibili coi flussi effettivamente osservati.

Il decadimento delle X produce abbastanza naturalmente uno spettro energetico che varia come una legge di potenza:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad \text{con} \quad 1 < \alpha < 2 \quad . \quad (1)$$

La cascata adronica delle X è inoltre dominata da fotoni e neutrini (più o meno indipendentemente dal modello) e questa è una distinzione fondamentale rispetto ai meccanismi di accelerazione. I nuclei non sono prodotti con questo tipo di meccanismi. In generale risulta non facile riprodurre i flussi di raggi cosmici osservati attraverso questi modelli. Inoltre questi modelli incorporano sempre nuova fisica e le loro predizioni sono altamente dipendenti dai modelli. Le sorgenti non sono necessariamente associate con oggetti astrofisici attivi al giorno d'oggi.

1.4 I neutrini di altissima energia

Il primo obiettivo scientifico del programma AirWatch è quindi la misura dello spettro energetico per $E \gtrsim 10^{19}$ eV con buona statistica e la possibile messa in evidenza di anisotropie o non uniformità nelle direzioni di arrivo.

È inoltre altamente verosimile che gli stessi meccanismi che sono all'origine dei raggi cosmici di altissima energia diano anche luogo a produzione di neutrini, essi pure di altissima energia. Questo è almeno quanto prevedono la maggior parte dei modelli.

In conseguenza del grande angolo di osservazione dall'alto, e quindi del grande volume sensibile, AirWatch sarà in grado di osservare un numero statisticamente significativo di eventi di neutrino, almeno sulla base di quanto previsto dai vari modelli. Infatti, assumendo la validità del Modello Standard delle interazioni fondamentali anche ad energie di $\gtrsim 10^{19}$ eV, la sezione d'urto νN continua ad aumentare, e ad energie $E \approx 10^{20}$ eV si ha $\sigma \sim 0.1 \mu\text{b}$, una sezione d'urto sufficientemente elevata perché neutrini cosmici producano sciami osservabili nella massa di atmosfera visibile con AirWatch. AirWatch sarà

soprattutto in grado di riconoscere sciami originati da neutrini da quelli prodotti da altre particelle, osservando, in particolare, sciami con grande angolo zenithale nonché, possibilmente, quelli provenienti dal basso.

Una volta prodotti i neutrini sono pochissimo influenzati dalla distribuzione di materia e di radiazione nello spazio nonché insensibili ai campi magnetici. Quindi l'osservazione e l'Astronomia dei neutrini, cioè l'identificazione delle sorgenti, rappresenta il secondo punto fondamentale del programma AirWatch. Il numero di eventi osservabili dipende molto dai flussi incidenti, che dipendono molto dai modelli.

I modelli che prevedono la produzione di neutrini cosmici con energia superiore a $E \approx 10^{18}$ eV sono svariati.

- Modelli di “difetti topologici” (TD) [24,25] predicono in generale flussi abbastanza elevati, per $E \gtrsim 10^{20}$ eV, corrispondenti a diverse decine di eventi all'anno in AirWatch.
- Modelli di AGN, ed in particolare in alcune categorie di Blazars, noti per emettere enormi quantità di energia come raggi γ . I meccanismi di tali processi sono assai mal conosciuti ed i flussi previsti variano di conseguenza da un modello all'altro. Alcuni modelli forniscono previsioni che arrivano fino alla decina di eventi all'anno [26].
- I Gamma Ray Bursts (GRB) sono considerati, allo stadio attuale delle nostre conoscenze, il processo astrofisico non continuo che libera più energia ($E \gtrsim 10^{52}$ erg solo per la componente di fotoni durante tempi di $0.1 \div 100$ s). Particelle possono venir accelerate in questi bursts ad energie molte elevate ed eventualmente produrre neutrini di alta energia. Anche in questo caso le stime dei flussi con i vari modelli sono molto diverse [27–34].
- I neutrini di Greisen sono quelli prodotti nel decadimento dei pioni generati nella fotoproduzione dai protoni con energia $\gtrsim 0.7 \cdot 10^{20}$ eV sul CMB. Le stime sono ancora una volta alquanto incerte con previsioni dell'ordine di alcuni eventi all'anno in AirWatch.

È da osservare infine che se a causa di uno dei precedenti processi (o altri) vi è un flusso di neutrini di altissima energia, i suddetti neutrini possono annichilarsi con gli antineutrini del Cosmic Neutrino Background (CNB) la cui densità media nel Cluster è stimata essere dell'ordine di $\approx 54 \nu / \text{cm}^{-3}$. Il decadimento dello Z^0 così generata produrrà principalmente fotoni e adroni. Se l'interazione avviene a distanze $\lesssim 50$ Mpc i prodotti di decadimento possono arrivare fino a noi senza essere influenzati dal meccanismo di GZK. Dati recenti in particolare quelli di AGASA sembrerebbero dare qualche evidenza di un

tale meccanismo. La misura con buona statistica e buona risoluzione angolare, che sarà possibile con AirWatch, permetterà di chiarire il contributo di un tale processo.

1.5 Altri obiettivi scientifici

È infine da sottolineare che AirWatch sarà in grado di contribuire ad altri due campi della fisica dello spazio.

Uno è lo studio nella regione dell'UV di fenomeni quali: Gamma Ray Bursts, rivelazione di esplosioni di Supernovae, misure di emissione dagli AGN e tutti i fenomeni transienti (anche su tempi molto brevi) dovuti a sorgenti galattiche ed extra-galattiche.

Il secondo campo che potrà venir esplorato è quello dei fenomeni elettromagnetici che avvengono nell'atmosfera e che danno luogo a emissioni luminose. Molti di questi fenomeni (quali "Blue Jets", "Elves" e "Starters") sono stati scoperti solo recentemente [35–40] ed i loro meccanismi sono ancora in gran parte incompresi.

1.6 Il metodo di rivelazione

Il bassissimo flusso dei cosmici per energie superiori a 10^{19} eV richiede fotorivelatori con area enorme, dell'ordine di 10^6 km², per ottenere un numero di eventi ragionevole.

L'atmosfera terrestre, che ha una massa complessiva di $\approx 5 \cdot 10^{18}$ kg, rappresenta un adeguato bersaglio. Una particella cosmica entrante in essa produce un EAS contenente miliardi di particelle secondarie, ed è questo sciame che viene osservato dal rivelatore. Ad esempio un protone primario di 10^{20} eV produce uno sciame che contiene circa 10^{11} secondari che a livello del suolo coprono un'area di circa 20 km².

Gli esperimenti tradizionali hanno fino ad oggi seguito il metodo di coprire vaste porzioni del suolo (dell'ordine delle decine di km²) con rivelatori di particelle [2,41] oppure di usare l'atmosfera come bersaglio attivo ed osservare dal suolo la luce di fluorescenza prodotta [17,16].

La prima tecnica misura le particelle cariche dello sciame che arrivano al suolo ed è indipendente dal giorno o dalla notte. La direzione d'arrivo del primario viene tipicamente ricostruita con una precisione dell'ordine di un paio di gradi misurando i tempi di arrivo dei secondari nei rivelatori disposti al suolo. L'energia del primario viene ricostruita dalla determinazione della densità dei secondari. Dalla misura della percentuale di muoni nello sciame si hanno indicazioni sulla natura del primario.

Con la tecnica di fluorescenza (e.g. Fly's Eye) si produce invece un'immagine dello sciame prodotto nell'atmosfera su un insieme di fotorivelatori veloci. Ogni elemento fotorivelatore corrisponde ad una zona del cielo. Lo sviluppo di uno sciame appare quindi sulla superficie focale come un insieme di punti luminosi allineati lungo una retta. L'inten-

sità dei vari punti è differente ed è proporzionale al numero di particelle cariche presenti nello sciame alla profondità corrispondente. Ciò permette quindi di osservare lo sviluppo longitudinale dello sciame ed avere una misura calorimetrica dell'energia dello stesso con un campionamento quasi continuo. Lo sciame ha uno sviluppo longitudinale ragionevolmente descritto dalla parametrizzazione di Gaisser-Hillas [42,43] che fornisce il numero N_e di elettroni prodotti nello sciame in funzione della profondità atmosferica x :

$$N_e(x) = N_{\max} \left[\frac{x - x_o}{x_{\max} - x_o} \right]^{(x_{\max} - x_o)/\lambda} \exp(x_{\max} - x)/\lambda \quad , \quad (2)$$

dove $\lambda \simeq 70 \text{ g cm}^{-2}$, x_o è la profondità alla quale avviene la prima interazione e x_{\max} rappresenta la posizione del massimo dello sciame. L'energia totale dello sciame è proporzionale all'integrale di $N_e(x)$, sapendo che la perdita media di energia per particella carica è di $\simeq 2.2 \text{ MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2)$.

Inoltre il profilo dello sciame ed in particolare la posizione del massimo sono funzioni della natura della particella incidente, anche se le fluttuazioni sono grandi. Ad esempio, per uno sciame di 10 EeV, si ha $x_{\max} \simeq 800 \text{ g cm}^{-2}$ e l'indeterminazione su x_{\max} è di circa g cm^{-2} . La direzione del primario è ricostruita dalla traccia misurata in proiezione sulla superficie dei fotorivelatori con in più l'informazione temporale sul tempo di arrivo sul fotorivelatore stesso, che quindi devono essere molto veloci. Un'alternativa, meno attraente, potrebbe essere usare più rivelatori lenti in modo da avere una visione stereo.

In ogni caso rivelatori disposti al suolo vedono necessariamente una limitata frazione dell'atmosfera. Le alternative, per poter osservare un numero di sciami ragionevole, sono quindi aumentare a dismisura l'area al suolo coperta dai rivelatori (ed è l'approccio di Auger) oppure osservare l'atmosfera dall'alto guadagnando quindi un enorme fattore sulla massa sensibile. È questo l'approccio di AirWatch, illustrato nella figura 4. AirWatch è concepito come un rivelatore da installare su un satellite o sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS). L'idea base del rivelatore è di generare un'immagine dello sciame su una superficie finemente quadrettata di fotorivelatori. Un sistema di lenti con grande apertura e grande campo di vista focalizzerà la luce di fluorescenza sulla superficie di rivelazione posta sulla superficie focale del sistema ottico. La segmentazione dei fotorivelatori e la risoluzione temporale devono essere sufficientemente piccoli da permettere di ricostruire la direzione del primario e l'energia dello sciame con precisioni almeno uguali a quelle ottenute in esperimenti in corso o in progetto.

Il tipico sviluppo di uno sciame è di circa $10 \div 100 \text{ km}$, a seconda della natura, dell'energia e dell'angolo d'incidenza del primario. La durata del passaggio attraverso l'atmosfera è corrispondentemente di $30 \div 300 \mu\text{s}$ circa. La luce di fluorescenza è emessa isotropicamente. Dal numero di fotoni N_{pe} misurati da ogni fotorivelatore si può risalire

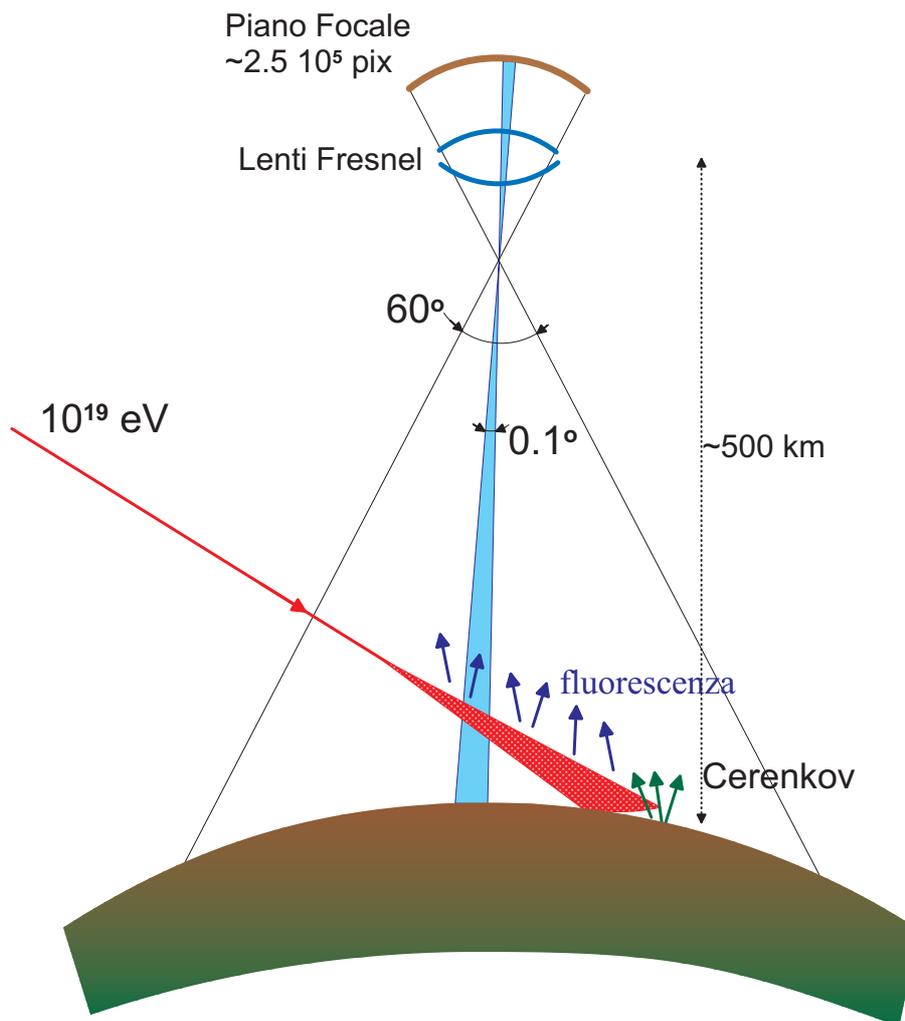


Figure 4: Schema di principio del concetto AirWatch.

al numero di elettroni presenti nella regione di spazio vista dal rivelatore, note l'emissività del processo di fluorescenza, la trasmittività dell'atmosfera e l'efficienza del sistema ottico e del fotorivelatore. In molti casi è altresì possibile misurare il segnale (ritardato) dovuto alla luce Cherenkov emessa dai secondari carichi e riflessa dalla superficie della Terra, dalle nuvole o del mare.

La stima attuale (basata su misure da satellite e da voli di palloni stratosferici) del fondo luminoso nell'intervallo di lunghezze d'onda $300 \div 400 \text{ nm}$ è di circa $3 \cdot 10^{11} \text{ fotoni m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$. Ne risulta che l'energia di soglia per AirWatch è di circa $4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ con una risoluzione in energia stimata di circa $15 \div 20\%$.

AirWatch sarà altresì capace di rivelare neutrini cosmici di altissima energia. La

tecnica di rivelare i neutrini attraverso l'osservazione degli sciame quasi orizzontali da essi prodotti nell'atmosfera è un'alternativa particolarmente vantaggiosa rispetto ad altre tecniche. Naturalmente occorre essere in grado di distinguere uno sciame generato da un neutrino da quello generato da un'altra particella. Neutrini che entrano nell'atmosfera diretti verso il basso penetrano profondamente prima di iniziare un EAS. Essi possono venir discriminati da protoni e fotoni con un'efficienza elevata usando un criterio di selezione richiedente che la profondità del punto d'inizio dello sciame sia maggiore di $\approx 10^3 \text{ g cm}^{-2}$ [44,45]. La direzione del neutrino incidente deve essere ricostruita con una adeguata risoluzione angolare. Simulazioni Monte Carlo indicano che la risoluzione angolare sulla traccia del neutrino varia circa fra $0.2^\circ \div 2^\circ$ a seconda dell'angolo zenithale, ma può essere ancora notevolmente migliorata utilizzando il segnale fornito dall'associata luce Cherenkov riflessa a Terra.

Per neutrini del τ diretti verso l'alto, per contro, la misura diretta della luce Cherenkov può fornire il segnale voluto (risoluzione angolare di 0.1° a qualunque angolo zenithale), con una soglia energetica dell'ordine di 10^{17} eV. La composizione di specie neutriniche tra l'altro si deve riflettere in variazioni della distribuzione angolare zenithale dei neutrini diretti verso l'alto poiché ogni specie di neutrino ha un cammino d'interazione diverso attraversando la Terra.

Fotoni con energia di 10^{20} eV danno origine (se presenti) a sciame molto elongati a causa dell'effetto Landau-Pomeranchuk-Migdal e ciò dovrebbe renderli distinguibili da protoni e neutrini.

Infine è da osservare che misure di fluorescenza sono possibili solamente dal lato oscuro della Terra. Ciò significa che il "duty cycle" delle misure sarà tipicamente non superiore a $\approx 10\%$, come è per altro il caso degli esperimenti basati a Terra che misurano la luce di fluorescenza. Malgrado questo fattore ci si aspetta comunque di osservare diverse migliaia di eventi all'anno con energie $\gtrsim 10^{19}$ eV.

Un periodo di tre anni di presa dati dovrebbe quindi fornire alcune migliaia di eventi. Nell'eventualità che non venga osservato nessun taglio in energia alla soglia GZK, una tale statistica permetterà di estendere la misura dello spettro energetico fino a circa 10^{22} eV fornendo quindi informazioni e limiti molto stringenti sulle possibili sorgenti e sui meccanismi di accelerazione. Se si osserverà viceversa un "cutoff" la forma dello spettro nuovamente darà indicazioni sulle sorgenti. È infine da notare che con una tale statistica si potrà mettere in evidenza una eventuale anisotropia fino ad un livello di qualche per cento.

2 L'apparato Sperimentale

2.1 Generalità

AirWatch/EUSO, essendo pensato per essere installato su un veicolo spaziale orbitante attorno alla Terra, deve soddisfare ad un certo numero di caratteristiche e vincoli che non hanno riscontro in apparati collocati al suolo. L'apparato, illustrato schematicamente nella figura 5, è composto essenzialmente da tre sistemi: il sistema ottico, il fotorelevatore nella superficie focale del sistema ottico e l'elettronica. Tali sistemi sono descritti in maggior dettaglio nei paragrafi seguenti. La filosofia generale alla base del disegno di Air-

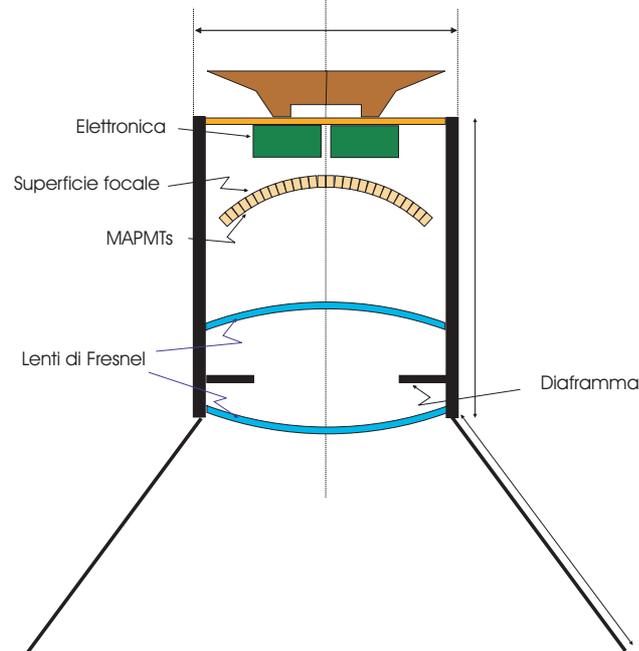


Figure 5: L'apparato sperimentale

Watch/EUSO è di garantire, da un lato, la rispondenza delle caratteristiche del rivelatore alle esigenze richieste dal programma di fisica, dall'altro soddisfare i vincoli imposti da una missione spaziale.

Il programma di fisica richiede in particolare che il rivelatore soddisfi ai seguenti requisiti.

1. Abbia un'accettanza effettiva (dopo tutte le correzioni dovute alle varie sorgenti di inefficienza) che sia ≈ 10 volte superiore a quella di Auger e del Telescope Array.

L'accettazione effettiva deve quindi essere dell'ordine di $\approx 10^5 \text{ km}^2 \text{ sr}$. Tale requisito garantisce un adeguato flusso di eventi di altissima energia.

2. La soglia in energia dev'essere nell'intorno di qualche 10^{19} eV . Tale requisito garantisce di rivelare anche parte dello spettro sotto l'energia di taglio di GZK ed avere un raccordo coi dati esistenti oltre che fornire un ben preciso punto di calibrazione.
3. Una granularità angolare dell'ordine di $\approx 0.1^\circ$.
4. Una risoluzione angolare sulla ricostruzione della direzione degli EAS dell'ordine di $\approx 1^\circ$, simile a quella di Auger.

I vincoli che nascono dalle operazioni di invio e di operazione nello spazio del sistema richiedono inoltre che l'apparato abbia le seguenti caratteristiche.

1. Sia compatto (diametro $D_{max} \lesssim 4 \text{ m}$ e lunghezza $L_{max} \lesssim 4.5 \text{ m}$) in modo da poter essere alloggiato in un vettore del tipo Delta III oppure nello Space Shuttle.
2. La massa sia contenuta: $M_{tot} \approx 1 \text{ ton}$.
3. Non richieda, possibilmente, operazioni di assemblaggio nello spazio né manovre di apertura più o meno complicate.
4. Sia affidabile e robusto, basato su soluzioni tecnologiche esistenti o quanto meno che richiedano solo un modesto programma di miglioramento o adattamento al caso specifico.
5. Abbia una struttura modulare che assicuri un'elevata affidabilità e semplifichi il progetto e la realizzazione.
6. Sia pronto ad andare in orbita nel 2005.

I parametri del progetto EUSO (per la ISS) sono riassunti nella tabella 2.1.

2.2 Sistema Ottico

Le caratteristiche principali del sistema ottico sono illustrate nella tabella 2.2.

Il sistema ottico è in grado di osservare un'area di $\simeq 290 \text{ km}$ di raggio sulla superficie della Terra, corrispondente ad una superficie di $\simeq 2.6 \cdot 10^5 \text{ km}^2$, con una risoluzione spaziale di circa $1 \times 1 \text{ km}^2$.

La risoluzione, tutto sommato modesta, che si vuole ottenere ha favorito la scelta di un sistema basato sulla tecnologia delle lenti di Fresnel, mettendo invece in seconda

General	
Desired pixel size at the Earth surface	$\Delta \approx 0.8 \text{ km}$
ISS average orbit height	$H \approx 380 \text{ km}$
Overall atmospheric transmission ($330 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$)	$K_{atm} \approx 0.4$
Background ($330 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$ at $\approx 400 \text{ km}$ height)	$B \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}$
Observation duty cycle	$\eta \approx 0.1 \div 0.2$
Orbital period	$T_0 \approx 90 \text{ min}$
Optics	
Optics maximum diameter	$D_M = 2.5 \text{ m}$
Optics aperture (entrance pupil diameter)	$D = 2 \text{ m}$
Optics $f\#$	$f\# = 1.25$
Optics field of view (half-angle)	$FOV = 30^\circ \equiv \gamma$
Average transmission of the optics	$K_{opt} \approx 0.5$
Photo-detector	
Geometry of the focal surface	spherical, radius = $D f\# = 2.5 \text{ m}$
Angular aperture of the focal surface	$\beta \approx 30^\circ$
Overall photo-detector efficiency	$\varepsilon_{det} \approx 0.15$

Table 1: I parametri di base di AirWatch/EUSO per la ISS.

Diametro della pupilla di ingresso	2.6 m
Massimo diametro delle ottiche	3.5 m
Campo di vista totale	60°
Risoluzione angolare	$\approx 0.1^\circ$
Spot size	$\approx 6 \text{ mm}$

Table 2: I parametri base dell'ottica di EUSO.

priorità soluzioni con elementi catadiottrici che avrebbero richiesto l'uso di meccanismi di apertura una volta messi in orbita. Le lenti di Fresnel offrono una grande apertura, un grande campo visivo e nello stesso tempo permettono una notevole riduzione della massa e dell'assorbimento. La riduzione di massa è ulteriormente facilitata dall'uso di polimeri a bassa densità che sono stati recentemente sviluppati [46].

Il sistema progettato comprende due lenti di Fresnel. Ciascuna lente è ricavata da un substrato sferico ed è incisa sui due lati. Il diametro delle lenti è inferiore a 3.7 m e questo le rende compatibili per l'invio tramite Shuttle o vettore tipo Delta III. Il sistema ottico è ottimizzato per lunghezze d'onda di $\lambda = 357 \text{ nm}$. L'effetto delle aberrazioni cromatiche è tale che comunque più dell'85% dell'energia nella banda fra $337 \div 391 \text{ nm}$ è contenuta in una regione che non dista più di un pixel dal pixel centrale. La Point Spread Function dell'ottica, il cui valore deve essere consistente con la dimensione del pixel sulla superficie

focale, vale ≈ 6 mm. L'inconveniente principale delle Lenti di Fresnel è la presenza di *scattering* e la riduzione di contrasto conseguente. Come discusso in [19] la perdita di segnale è però accettabile. Prototipi delle lenti di Fresnel sono state prodotte all'Università di Alabama, Huntsville lavorando direttamente al tornio un blocco di materiale plastico. Tests di *radiation hardness* sono stati effettuati ed hanno dimostrato la possibilità di usare tali materiali nello spazio. Le lenti di EUSO verranno prodotte per stampaggio (anziché lavorarle direttamente) il che ridurrà i costi e fornirà una qualità almeno altrettanto buona.

Un filtro ottico (depositato sulle lenti o inserito in modo indipendente) limiterà la banda di lunghezze d'onda all'intervallo $330 \div 400$ nm ove è concentrata la maggior parte dell'emissione luminosa di fluorescenza del N_2 . È stato costruito un prototipo di filtro interferenziale che trasmette più del 90% della luce incidente fino a grandi angoli di incidenza.

Una soluzione alternativa, basata su un sistema catadiottrico, che offrirebbe dei vantaggi, è in fase di studio ma è stata messa in seconda priorità, a questo stadio, perché richiederebbe un sistema di apertura nello spazio. Data l'importanza di tale elemento nel progetto è importante però studiare, con simulazioni e semplici modelli, anche sistemi alternativi basati su soluzioni differenti, nell'ottica di una ridondanza necessaria in questa fase del progetto.

2.3 Il fotorivelatore

Con la dicitura fotorivelatore si intende tutto il sistema di rivelazione di fotoni di AirWatch/EUSO che include il sensore, il sistema di raccolta della luce sul sensore, l'elettronica associata e tutta la struttura meccanica di supporto.

Le caratteristiche generali richieste al fotorivelatore nella superficie focale sono le seguenti.

- Sensibilità al fotone singolo nella banda $330 \div 400$ nm, che comprende bande di emissione della luce di fluorescenza dell'azoto e in cui l'atmosfera è relativamente trasparente.
- Velocità di risposta (inferiore al microsecondo) in modo da poter seguire lo sviluppo dello sciame e poter ricostruire la direzione dello sciame da un singolo punto d'osservazione.
- Basso rumore e buon rapporto segnale-rumore.
- Grande superficie (dell'ordine di diversi metri quadrati) a causa del grande campo di vista desiderato (60° a pieno campo di vista). Per contro non è richiesta una elevata risoluzione spaziale (alcuni mm sono sufficienti).

- Basso consumo, massa ridotta, robustezza meccanica, resistenza alle radiazioni, ridotta sensibilità ai campi magnetici, affidabilità e stabilità nel tempo.

La dimensione del pixel nella superficie focale è legata alla granularità spaziale con la quale si vuole campionare lo sviluppo dello sciame. La dimensione del pixel determina a sua volta la risoluzione angolare, σ_θ , con la quale si determina la direzione dello sciame.

Con riferimento alla figura 6 si trova infatti che, richiedendo $\sigma_\theta \simeq 1^\circ$, l'apertura angolare del singolo pixel dev'essere $\Delta\alpha \lesssim 0.1^\circ$ (si veda [47] per la derivazione completa).

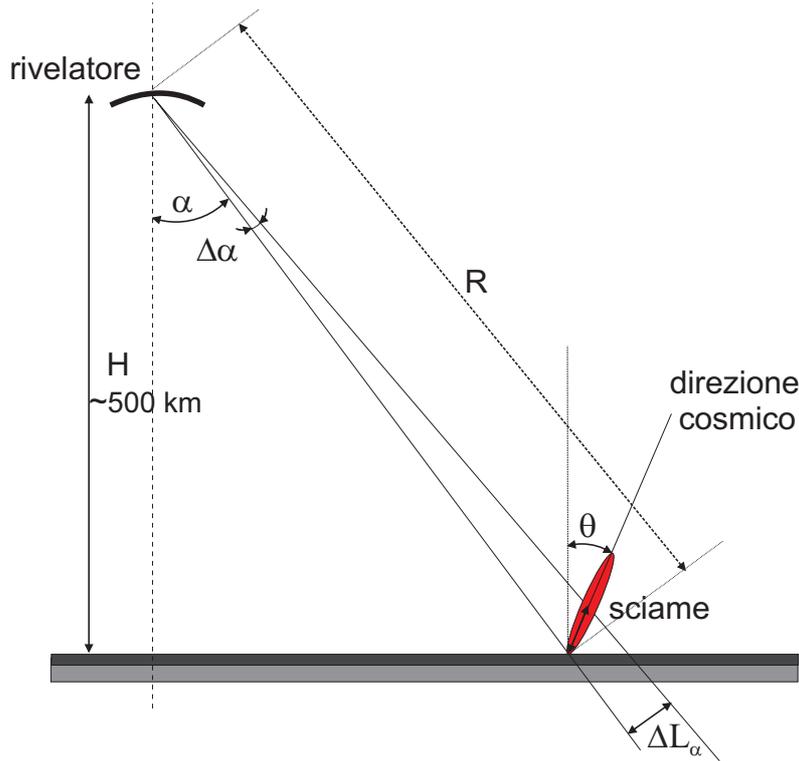


Figure 6: Geometria della rivelazione di EAS dallo spazio.

Poiché d'altra parte

$$d_{pixel} \simeq f \Delta\alpha \quad , \quad (3)$$

dove f è la distanza focale del sistema ottico, la dimensione ottimale del pixel risulta: $d_{pixel} \simeq 6$ mm per $f = 3$ m.

La lunghezza dell'elemento di traccia ΔL_α relativo e quindi la granularità spaziale con la quale lo sciame è campionato risulta essere: $\Delta L_\alpha = \frac{H}{\cos \alpha} \Delta\alpha$ il che fornisce $\Delta L_\alpha \simeq 1$ km che rappresenta un valore ragionevole considerato che lo sviluppo tipico di un EAS è $\gtrsim 10$ km.

La dimensione della superficie focale, che per inciso è curva, è ovviamente legata alle caratteristiche del sistema ottico, lunghezza focale ed angolo di campo,

$$D_{rivel} = 2f \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) = 2f_{stop} D_{in} \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \quad , \quad (4)$$

volendo esprimerlo in funzione del diametro della pupilla d'ingresso, D_{in} , e del numero-f dell'obiettivo, f_{stop} . Il disegno attuale di EUSO implica che $D_{rivel} \simeq 3.7$ m. Il numero di pixels risultante è quindi di circa $2.6 \cdot 10^5$.

Il sistema dei fotorivelatori deve inoltre soddisfare ad altre esigenze:

- ridurre al minimo le zone morte;
- avere massa limitata;
- possibilità e fattibilità di adattare i dispositivi alla curvatura della superficie focale (struttura modulare);
- elevata efficienza di rivelazione;
- trasparenza complessiva agli UV elevata nella regione $330 \div 400$ nm;
- frequenza del rumore di corrente oscura inferiore al rumore di fondo del cielo oscuro (10 kHz è ragionevole);
- buona uniformità dell'efficienza di raccolta dei fotoni fra pixel e pixel (non è invece molto importante l'uniformità di guadagno fra i vari pixels poiché il sistema di lettura conta i fotoni);
- piccolo cross-talk fra pixel vicini;
- basso livello di after-pulse;
- consumo ridotto;
- essere spazializzati o compatibili con le esigenze spaziali;
- garanzia di funzionamento stabile sull'arco di diversi anni ($5 \div 10$ anni);
- costo ragionevole.

2.3.1 Specifiche dei sensori

Il numero di dispositivi con caratteristiche simili o vicine a quelle elencate precedentemente, che siano disponibili sul mercato, o quanto meno ad uno stadio di sviluppo e di test così avanzato da poter essere considerati, è alquanto ridotto.

Dopo un accurato esame di vari tipi di sensori (che presentano per altro caratteristiche assai interessanti) la scelta si è concentrata sui fotomoltiplicatori multianodo (MAPMT), pur restando aperti e pronti a reagire nel caso si rendessero effettivamente disponibili a tempi brevissimi altre soluzioni per ora messe in seconda priorità, quali Flat Panel PMTs [48] oppure Hybrid Photon Detectors [49–51].

In particolare la Hamamatsu Corporation produce dei MAPMT (tipo R7600) [53] con varie configurazioni di pixels. Fra quelli più interessanti per AirWatch/EUSO ci sono la versione con 4×4 pixels quadrati, con lato di circa 4.3 mm, e la versione con 8×8 pixels quadrati, da 2 mm di lato. Le dimensioni esterne per queste due configurazioni sono di 25.7×25.7 mm²; la lunghezza è $\simeq 33$ mm e la massa $\simeq 30$ g.

Il fotocatodo è un bi-alkali e la finestra di ingresso UV-trasparente è spessa 0.8 mm. L'efficienza quantica è dell'ordine di 20% nell'intervallo di lunghezza d'onda di interesse, con massimo a $\lambda \simeq 420$ nm. La struttura dei dinodi (12 stadi) è a Metal Channel e fornisce un guadagno dell'ordine di $3 \cdot 10^5$ per una tensione anodica di 0.8 kV con un partitore resistivo di tipo convenzionale.

L'inconveniente del sensore (per altro comune ad altre soluzioni) è rappresentato dalla non trascurabile zona morta; il rapporto fra l'area attiva dei pixels e l'area della struttura esterna del fotomoltiplicatore è di circa 45%. La difficoltà è parzialmente aggirabile con un sistema di collettori di luce di fronte posti di fronte ai sensori che adattino il reticolo di pixel alla superficie focale. Sono stati studiati diversi sistemi di collezione della luce, descritti nel paragrafo 2.3.2.

Le variazioni di guadagno tra diversi pixels dello stesso MAPMT e le variazioni di guadagno medio tra diversi MAPMTs sono entrambe riportate del costruttore essere inferiori a 3 : 1.

Il MAPMT è sensibile all'effetto di campi magnetici. Misure recenti [52], compatibili con le specifiche del costruttore, mostrano piccola sensibilità a campi magnetici trasversali, mentre campi magnetici longitudinali $\mathcal{O}(10)$ gauss danno effetti significativi sulle due righe più esterne di colonne. Infatti un campo magnetico longitudinale di $B \simeq 30$ gauss riduce il loro segnale di circa il 50%. Il campo geo-magnetico medio atteso lungo l'orbita è inferiore al gauss e ha quindi un effetto trascurabile.

I dati forniti dal costruttore sulla stabilità a lungo termine delle operazioni del MAPMT sono compatibili con la missione AirWatch/EUSO proposta.

Gli effetti delle radiazioni implicano principalmente un ingiallimento del vetro della finestra di ingresso. I dati del costruttore [54] mostrano che il vetro UV-trasparente ha una migliore resistenza alle radiazioni che il normale borosilicato. Quindi, per quanto non strettamente richiesto dalla banda spettrale della presente applicazione, è comunque opportuno usare la versione con finestra in vetro UV-trasparente.

Tests preliminari, effettuati a Trieste [55], Genova e Palermo, hanno dato risultati consistenti con le specifiche fornite dal costruttore.

2.3.1.1 Aspetti operativi relativi al fotorivelatore. La potenza dissipata per operare il MAPMT dipende dalla scelta del partitore. Avendo optato per una lettura binaria la linearità della risposta non è un parametro critico. Ammettendo di tollerare variazioni di guadagno di circa 10% con una tensione anodica di 0.9 kV la potenza complessiva richiesta è di $\simeq 0.5$ kW. La potenza dissipata può facilmente venir ridotta a circa $\simeq 0.2$ kW, alimentando separatamente con un secondo alimentatore gli ultimi stadi del MAPMT. La potenza dissipata può venir ulteriormente ridotta usando tre alimentazioni separate oppure usando partitori attivi.

A causa del relativamente breve periodo orbitale (circa 1.5 ore) e del tempo di stabilizzazione richiesto dai MAPMTs dopo ogni variazione della tensione applicata (circa 30 min) è necessario mantenere i MAPMTs sempre sotto tensione costante. Un opportuno shutter avrà la funzione di mantenerli schermati dalla luce durante le fasi di esposizione luminosa.

I MAPMTs verranno inoltre operati alla tensione più bassa possibile al fine di aumentare la vita media del tubo ed altresì per avere la possibilità di aumentare il guadagno durante la missione per compensare possibili variazioni di guadagno nel tempo. Guadagni inferiori a 10^5 sono per altro totalmente compatibili con i chips di lettura, esistenti e in via di sviluppo (vedi paragrafo 2.5.1).

Le variazioni del guadagno medio tra diversi MAPMTs possono essere parzialmente equalizzate raggruppando insieme dispositivi con guadagno simile tra loro alimentati alla stessa tensione. I guadagni medi sono poi equalizzati fissando opportunamente la tensione applicata ai vari gruppi per ottenere il guadagno desiderato. L'effetto delle variazioni di guadagno tra diversi pixels dello stesso dispositivo può essere trattato utilizzando soglie programmabili dei discriminatori (paragrafo 2.5.1). Queste variazioni di guadagno sono, in ogni caso, dominate da pochi pixels che hanno un guadagno molto diverso da quello medio mentre la maggior parte dei pixels mostrano guadagni molto simili tra loro [54].

Andrà posta la massima attenzione alla protezione del fotocatodo dall'esposizione a forti sorgenti luminose per evitare danni irreversibili, o quanto meno, invecchiamenti precoci.

Analogamente andrà posta la massima cura nell'evitare eccessive variazioni termiche che possono portare danni più o meno reversibili del MAPMT.

MAPMTs della stessa famiglia, con un singolo pixel, hanno volato di recente con successo durante il volo di prova dell'apparato AMS [56] sullo Shuttle.

2.3.2 *Il collettore di luce*

È stato già avviato un programma di R&D finalizzato a trovare possibili soluzioni al problema della piccola accettazione geometrica dei MAPMTs, che altrimenti limiterebbe alquanto le prestazioni dei dispositivi commerciali così come sono, e che appare come uno dei maggiori limiti all'uso degli stessi in AirWatch/EUSO. Il problema maggiore non è tanto la bassa accettazione geometrica complessiva, $\approx 45\%$, quanto il fatto che l'accettazione risulterebbe disuniforme sulla superficie focale, con zone sensibili separate da zone morte e con la conseguente difficoltà a ricostruire integralmente una parte delle EAS. Poiché infatti un pixel corrisponde ad una copertura al suolo di circa 1 km^2 e la lunghezza tipica di una EAS è dell'ordine della decina di km o più, la conseguenza potrebbe essere che una parte delle EAS sarebbe ricostruita solo parzialmente.

L'accettazione geometrica può essere migliorata usando un opportuno sistema di collezione di luce sulla superficie focale, davanti ad ogni MAPMT, che effettui la compressione dell'immagine dall'area geometrica all'area sensibile del MAPMT. Tale sistema avrebbe l'addizionale vantaggio di porsi come ottima locazione per i filtri necessari a selezionare la banda ottica interessante. Il sistema potrebbe essere un sistema a lenti, un sistema fatto di un gruppo di guide di luce coniche oppure un fascio di fibre ottiche coniche.

Per il momento la soluzione più realistica, che è stata sviluppata e testata, consiste nel montare una lente emisferica piano-convessa di fronte al MAPMT, con la faccia piana in contatto ottico con la finestra di ingresso del MAPMT e coincidente con la superficie focale originale e la faccia sferica rivolta verso i raggi incidenti. Alternativamente è possibile lasciare un piccolo spazio tra la finestra d'ingresso del MAPMT e la faccia piana della lente, in caso l'accoppiamento ottico tra lente e MAPMT fosse difficoltoso da realizzare da punto di vista ingegneristico. In approssimazione parassiale una lente emisferica con la faccia piana coincidente con la superficie focale di un obiettivo rifocalizza i raggi incidenti sulla stessa superficie focale ma formando un'immagine rimpicciolita di un fattore dato dall'indice di rifrazione del materiale della lente. Una schema del mosaico di lenti risultante è riportato in figura 7.

Sono state effettuate simulazioni del funzionamento di questo sistema di raccolta di luce e misure su alcuni prototipi. I risultati mostrano che è possibile ottenere una efficienza globale di raccolta della luce del 62% per un angolo di incidenza massimo dei fotoni fino a

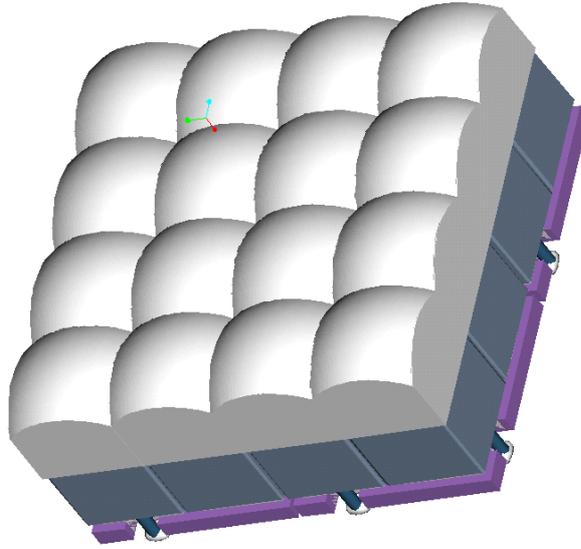


Figure 7: Il mosaico di lenti che fungono da sistema di raccolta di luce sul MAPMT.

30° . La lente introduce un peggioramento della risoluzione spaziale inferiore a 1 mm. Con tale sistema, inoltre, non esistono zone totalmente morte e l'efficienza è sostanzialmente uniforme sulla superficie focale.

Per rimpicciolire l'immagine dalla superficie focale sull'area sensibile del MAPMT si possono anche usare fasci di fibre ottiche coniche oppure fasci di guide di luce coniche, questi ultimi funzionanti a riflessione oppure a riflessione interna totale. Entrambi i sistemi sono stati analizzati ma richiedono ancora una fase di ricerca e sviluppo ulteriore per essere realizzabili [57].

2.3.2.1 Impatto del sistema di raccolta di luce sul fotorivelatore. Il sistema di raccolta di luce si trova immerso in un ambiente con un significativo fondo da parte di particelle energetiche cariche che possono produrre luce Cherenkov passando nel collettore (così come nelle lenti principali). L'effetto della luce Cherenkov, e il livello complessivo di fondo che tale effetto produce, deve essere valutato attentamente, ma in ogni caso in AirWatch/EUSO, un particella carica di alta energia che passa attraverso uno dei componenti trasparenti produce un lampo di luce Cherenkov di breve durata (alcuni nanosec-

ondi), molto più breve rispetto al segnale prodotto da una EAS, che ha durata dell'ordine dei microsecondi.

Il sistema è semplice ed economico; se realizzata in quarzo la massa complessiva è paragonabile a quello dei fotomoltiplicatori. Usando lo stesso tipo di plastica che per le lenti di Fresnel la massa può diminuire di un fattore circa tre e potendo venir stampata in uno stampo di precisione il costo è anche ridotto. La scelta del materiale più adatto è del tutto analoga a quella del materiale più adatto per le lenti principali.

Sono stati costruiti prototipi del sistema a lente emisferica usando la tecnologia del Sol-Gel [58,59]. Tale tecnologia permette la produzione di componenti ottici di quarzo con un procedimento di stampaggio che fornisce buona qualità ottica ad un costo moderato. Questi sono in fase di test per verificare la loro rispondenza ai requisiti, in particolare per quello che riguarda la trasmissione complessiva, la precisione della realizzazione meccanica e la finitura superficiale.

2.4 Ingegnerizzazione della superficie focale

2.4.1 Struttura della superficie focale

Poiché la superficie focale, con l'attuale disegno dell'ottica, è curva la disposizione dei MAPMTs e relativo collettore di luce andrà ottimizzata in modo da ridurre il più possibile le perdite in accettazione geometrica dovuta a spazi morti tra i diversi MAPMTs ed effetti di defocalizzazione dell'immagine. Tutto questo rende l'assemblaggio della superficie focale complesso.

La struttura di supporto che sarà realizzata in materiale composito dovrà essere modulare e garantire stabilità e precisione di posizionamento.

Una superficie focale curva richiede una struttura modulare. La struttura può essere costituita da unità funzionali di dimensioni limitate assemblate in super-moduli.

Il modulo elementare è costituito da un numero limitato di MAPMTs e dai componenti associati, con alcune risorse eventualmente comuni quali un comune PCB di supporto, un comune alimentatore di alta tensione (ed eventualmente il partitore di tensione), eventuali schermi elettrici o magnetici, l'elettronica di front-end e quanto possibile dell'elettronica di read-out integrata nel modulo. Ogni modulo è essenzialmente autonomo e gruppi di moduli sono assemblati in super-moduli la cui geometria è determinata essenzialmente dalle caratteristiche della superficie focale dell'ottica.

Andrà previsto un sistema di controllo attivo della temperatura per mantenere, durante la notte, la stessa temperatura raggiunta durante il giorno al fine di evitare stress termici e operare i dispositivi nelle condizioni ideali di temperatura, approssimativamente costante. In particolare occorre evitare eccessivi surriscaldamenti dei MAPMTs.

2.4.2 *Integrazione del sensore*

L'integrazione del MAPMT nella superficie focale deve tener conto di vari fattori. La zona morta tra i moduli diversi deve essere minimizzata. La potenza dissipata dal partitore di tensione e dall'elettronica deve essere dissipata (essenzialmente per conduzione oppure radiazione). Un prototipo della basetta di supporto per i MAPMTs è stato sviluppato. Permette un impacchettamento di 2×2 MAPMTs con una zona morta tra l'uno e l'altro di 1 mm e include, nel PCB, uno strato di rame per aiutare la dissipazione del calore prodotto nel partitore di tensione. Lo schema è riportato nella figura 2.4.2. Nello schema previsto per la fase di test i segnali escono dalla basetta tramite un connettore ad alta densità ed un cavo flessibile. Per il prodotto finale occorrerà prevedere l'installazione del chip di front-end sul retro della basetta.

Qualunque forma di luce parassita deve essere accuratamente evitata, incluso eventuali luci provenienti dal retro del MAPMT. Le alte tensioni richiedono un accurato isolamento, per evitare fenomeni di scarica, e i circuiti elettrici richiedono quindi incapsulamento in resine isolanti. La temperatura deve essere tenuta approssimativamente costante ai valori appropriati, per evitare sforzi termici e operare nel più opportuno intervallo di temperatura per il MAPMT. Occorre tener conto della significativa tolleranza sulle dimensioni fisiche dei MAPMTs (fino a 0.5 mm). La grande superficie focale deve poter sopportare gli effetti dell'espansione termica senza compromettere l'integrità dei MAPMTs. Il sistema di alte e basse tensioni deve essere progettato attentamente rispetto alla modularità, al numero di alimentatori indipendenti e ai raggruppamenti ottimali al fine di ottimizzare la affidabilità e le prestazioni del sistema.

2.4.3 *Organizzazione della superficie focale*

La superficie focale può essere assemblata a partire da super-moduli piani e usando possibilmente solo un numero limitato di forme differenti, ciò per ridurre la complessità del progetto e della realizzazione, semplificare l'elettronica di trigger e l'analisi dei dati. Questo requisito va bilanciato con la necessità di adattarsi bene alla forma della superficie focale per evitare effetti di defocalizzazione. Altro parametro chiave è la necessità di non avere super-moduli di dimensioni troppo ridotte, in quanto lungo gli spigoli dei super-moduli è inevitabilmente presenta un'area morta.

Se la superficie focale è sferica esistono varie possibilità di approssimarla con una parte di un poliedro regolare, che richiede un solo tipo di super-modulo, oppure con una parte di un solido Archimedeo, che consiste di facce con due sole diverse forme, oppure anche poliedri con un numero di facce distinte superiore a due. Le dimensioni dei moduli sono strettamente determinate dal raggio di curvatura della superficie focale e dalla ge-

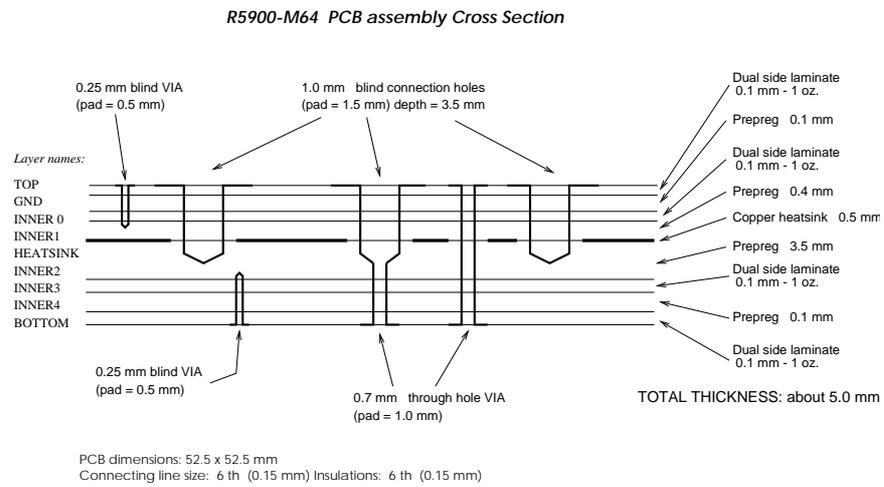
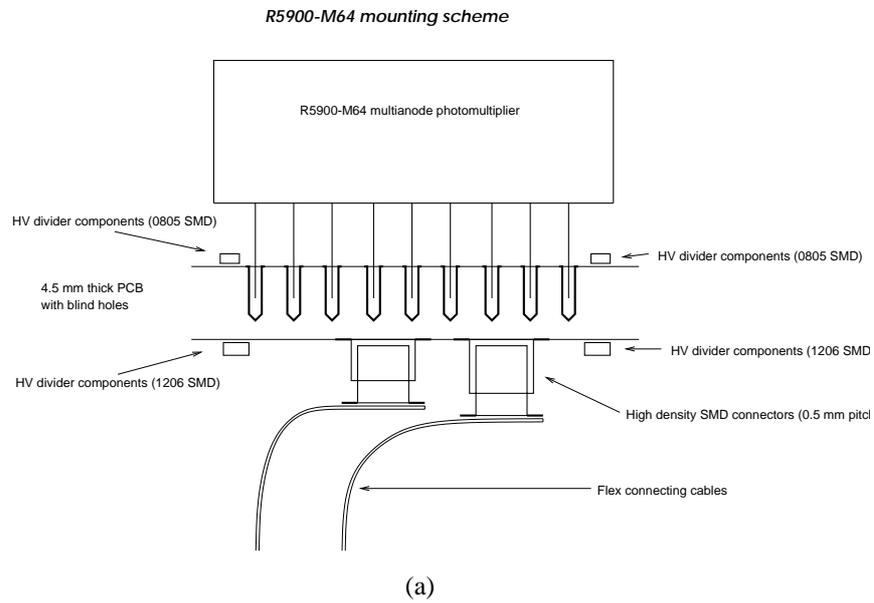


Figure 8: Schema della basetta per il modulo elementare di di 2×2 MAPMTs. Per il prodotto finale occorrerà prevedere l'installazione del chip di front-end sul retro della basetta.

ometria. Se la superficie focale si differenzia troppo da una superficie sferica, o in caso i semplici poliedri descritti sopra non forniscano un adattamento sufficientemente buono alla superficie focale oppure se le forme geometriche richieste risultassero sconvenienti, geometrie alternative possono essere concepite, a prezzo di aumentare il numero di super-moduli diversi. Una forma generale, adattabile in linea di principio a qualunque superficie a simmetria cilindrica, incluso, come caso particolare la sfera, è riportata in figura 9. I super-moduli sono dei trapezi piani ad eccezione di quello sull'asse di simmetria che è un poligono regolare.

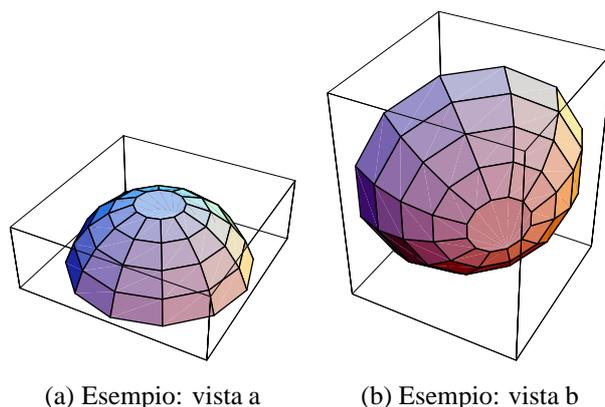


Figure 9: Due viste di una possibile suddivisione in super-moduli piani della superficie focale.

Il numero di super-moduli andrà ottimizzato considerando l'area morta tra i super-moduli (che aumenta all'aumentare del numero di super-moduli), la necessità di avere un buon adattamento alla superficie focale (la criticità di tale richiesta dipende dalla profondità di fuoco dell'ottica e l'approssimazione diventa chiaramente migliore aumentando il numero di super-moduli) e la richiesta di semplicità di avere il minimo numero possibile di forme per i super moduli da progettare e realizzare. Infine il disegno deve essere compatibile con l'architettura dell'elettronica di trigger e lettura.

La migliore soluzione deve essere determinata tenendo in considerazione la forma della superficie focale, l'ottimizzazione dell'adattamento alla superficie focale, il numero di moduli elementari e super-moduli e i vincoli imposti dall'elettronica di trigger e lettura.

2.5 Elettronica

La dicitura elettronica raggruppa quattro sottosistemi funzionalmente ben distinti: l'elettronica di front-end, l'elettronica di Trigger, il sistema di Acquisizione e l'elettronica di Controllo.

Il programma di fisica richiede un'elettronica veloce, con un elevato numero di canali e quindi alta integrazione e basso rumore. L'utilizzo in missioni spaziali richiede affidabilità, dimensioni e massa limitati, basso consumo e resistenza alle radiazioni. Il progetto deve essere semplice, per migliorare l'affidabilità e puntare all'economizzazione delle risorse.

2.5.1 Elettronica di front-end

L'elettronica di front-end svolge il compito di preamplificare il segnale del MAPMT, di discriminare il segnale con una soglia programmabile, di mascherare eventuali canali rumorosi, di fornire informazioni al sistema di trigger, effettuando possibilmente un primo livello di trigger, e di immagazzinare l'informazione fino a quando non viene letta.

Le caratteristiche più importanti e critiche sono un guadagno e un'impedenza di ingresso ottimali che si adattino al segnale del MAPMT, una buona risoluzione a doppio impulso (che deve essere dell'ordine della decina di ns) e capacità di determinare l'informazione temporale (con precisione dell'ordine della decina di ns). Il consumo è uno degli aspetti critici. assumendo di disporre per l'elettronica di una potenza di ≈ 0.25 kW e un numero totale di canali dell'ordine di $2.6 \cdot 10^5$ si hanno a disposizione ≈ 1 mW, complessivamente, per ogni canale per tutta la catena elettronica.

Dato il grande numero di canali, nonché i vincoli di dimensioni e massa, occorre considerare un chip di front-end altamente integrato per la lettura del segnale e che sia possibilmente in grado di effettuare anche il primo livello di trigger. Occorre una struttura molto compatta a distanza minima dal sensore, un sistema modulare con cablaggi minimali e capacità di auto-triggering.

Negli ultimi anni è stato fatto uno sforzo enorme, in particolare in fisica delle Alte Energie, per sviluppare elettronica analogica e digitale veloce, resistente alle radiazioni e a basso consumo da usarsi nei futuri esperimenti, in particolare al collider LHC. Di fatto nessuno dei chips esistenti soddisfa esattamente le caratteristiche richieste da Air-Watch/EUSO, ma alcuni di questi hanno caratteristiche vicine a quello che serve, dimostrando che le richieste possono essere soddisfatte [60,61]. Questi chips usano tecnologie resistenti alle radiazioni. In particolare DMILL è una tecnologia BiCMOS che usa sia dispositivi bipolari (per ottenere un front-end veloce e a basso consumo) che CMOS (per logica e memorie a basso consumo). È particolarmente adatta per integrare elettronica analogica veloce con elettronica digitale in un singolo chip.

I dispositivi esistenti sono normalmente progettati per leggere i segnali di sensori a stato solido, cioè con un segnale molto più piccolo che il segnale dei MAPMTs. Il guadagno è quindi superiore a quello richiesto e il range dinamico troppo limitato. Questo

significa che il front-end deve essere riprogettato con minore guadagno e maggiore range dinamico e/o il MAPMT deve essere operato a guadagno inferiore a quello tipico.

Oltre ai dispositivi in fase di sviluppo per applicazioni di fisica, è opportuno anche considerare e tenere sotto controllo i possibili sviluppi di chips commerciali (come [62]) che presentano caratteristiche interessanti e che potrebbero, con un opportuni adattamenti, arrivare a soddisfare le caratteristiche richieste.

2.5.2 *Elettronica di trigger e sistema di acquisizione dati*

Un elemento cruciale sarà la messa a punto di un efficace sistema di trigger per selezionare gli sciame estesi con alta efficienza e buona reiezione del fondo.

Il grande numero di canali, la velocità e il basso consumo richiesti fanno sì che l'elettronica risulti complessa e richieda soluzioni dedicate.

L'architettura è modulare e punta ad ottimizzare ed economizzare le risorse. La superficie focale è suddivisa in macrocelle, in maniera compatibile con la segmentazione della superficie focale in super-moduli, e che sono l'elemento base del sistema di elaborazione dei dati. Ogni macrocella include l'elettronica di front-end e una memoria per la conservazione locale dei dati. L'architettura della macrocella riduce il numero di canali effettuando un OR logico lungo le due direzioni perpendicolari. In tal modo in una macrocella rettangolare di $n \times m$ pixels il numero di canali passa da nm a $n+m$ canali. La tecnica elaborata, che prevede il conteggio di singoli fotoni con una risoluzione temporale dell'ordine di poche decine di nanosecondi, permette di usare una semplice elettronica binaria. Il trigger globale è effettuato da un'unità centrale che riceve i segnali dalle varie macrocelle. Il sistema permette di registrare la posizione e il tempo di arrivo dei singoli fotoni. Il sistema di trigger è descritto in [64].

2.5.2.1 Architettura. Tale sistema costituisce l'insieme dell'elettronica che governa ogni macrocella. Uno degli obiettivi primari è la riduzione del numero totale di canali di read-out, per minimizzare la complessità e la potenza richiesta. Tale obiettivo è raggiunto tramite un sistema semplice ma efficace che gestisce i diversi canali attraverso un OR logico per righe e per colonne. Il modulo di front-end svolge i seguenti compiti:

- convertire il segnale analogico dal sensore in segnale binario tramite un discriminatore a soglia programmabile;
- contare gli impulsi logici e fornire un segnale d'uscita al raggiungimento di una soglia prefissata e programmabile;

- suddividere i segnali logici nelle due componenti X ed Y e nella componente temporale.

Tale componente sarà costruito come un ASIC VLSI.

Una serie di memorie circolari vengono scritte continuamente, per le componenti X ed Y , riflettendo lo stato delle righe e delle colonne della macrocella. All'arrivo di un trigger e dopo un adeguato intervallo di tempo, il processo di scrittura viene fermato e le memorie sono lette all'indietro quanto basta per recuperare le informazioni sull'evento. In presenza di eventi a traccia singola l'ORing non introduce ambiguità, in quanto il segnale della traccia è coerente nello spazio e nel tempo, mentre il background è normalmente incoerente. Il canale temporale fornisce i tempi di arrivo relativi e il numero di fotoni rivelati nella macrocella corrispondente.

La separazione del segnale atteso dal fondo si basa sulle peculiari caratteristiche del segnale di un EAS: una traccia luminosa rettilinea, della durata di alcune decine di μs . Tali caratteristiche differenziano radicalmente il segnale sia dal fondo casuale della *nightglow* che dai possibili fondi di origine umana, terrestre, marina o atmosferica.

2.5.3 Elettronica di controllo

L'elettronica di controllo ha il compito di gestire le operazioni dell'apparato scientifico e di gestire l'interfaccia con il Modulo di Servizio. Le sue funzioni principali sono le seguenti.

- Raccolta dei dati scientifici provenienti dal fotorivelatore, che consistono nella posizione e nel tempo di arrivo dei fotoni rivelati.
- Raccolta delle informazioni di monitoraggio e controllo, per verificare il corretto funzionamento dell'apparato.
- Preparazione dei dati (sia scientifici che di controllo) per l'invio a Terra e loro trasmissione al Modulo di Servizio attraverso il *bus* di gestione dei dati di bordo (On-Board Data Handling, OBDH, bus).
- Ricevere, convalidare e distribuire i comandi provenienti dall'OBDH.
- Controllare i modi di operazione durante l'osservazione, le fasi di diagnostica e di calibrazione. Questi modi di operazione includono anche l'automatico mantenimento dell'apparato in condizioni di sicurezza.
- Provvedere la capacità di correzione e riprogrammazione dell'apparato.

- Gestione delle informazioni temporali.
- Gestire le necessarie conversioni tra il Modulo di Servizio e l'apparato sperimentale.

Tutta l'elettronica di controllo può essere configurata come un classico sistema basata su una architettura a microprocessore.

2.6 Il background

Il fondo atteso osservando la Terra di notte dallo spazio è dato principalmente da luci artificiali, luce diffusa e riflessa della Luna e di altri corpi celesti, processi fotochimici nell'atmosfera, mare e Terra.

Alcune misure preliminari del fondo sono state portate a termine recentemente [65]. Il risultato della misura del fondo della *nightglow* risulta essere $B \approx 3 \cdot 10^{11}$ fotoni $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$.

Ulteriori misure sono attese dal esperimento AURORA, il cui lancio in orbita, a bordo del microsatellite MegSat1, è previsto per la fine dell'anno 2000. Il satellite, di dimensioni $0.6 \times 0.45 \times 0.45 \text{ m}^3$ ha una massa complessiva di 50 kg ed effettuerà un'orbita inclinata di 81° sull'equatore ad una altezza di 900 km per una durata di almeno due anni. Il sistema è composto da un obiettivo di 50 mm di diametro, lunghezza focale 240 mm e campo di vista totale di 10° . La superficie focale contiene quattro MAPMTs Hamamatsu che sono letti da un chip della IDE-AS [62]. AURORA, ottimizzato per effettuare fotometria, effettuerà misure del fondo notturno nella banda $300 \div 400 \text{ nm}$ in un ambiente simile a quello di EUSO e fungerà da prototipo del fotorivelatore (sensori ed elettronica), verificandone funzionamento, stabilità affidabilità e resistenza alle radiazioni durante una missione spaziale.

2.7 Calibrazioni

Sono in fase di studio metodi di calibrazione attiva.

Una prima ipotesi prevede l'uso di un laser con energia di pochi mJ a bordo che avrebbe lo scopo di misurare il coefficiente di assorbimento dell'atmosfera usando un fascio di intensità nota. Questo darebbe la stima dell'assorbimento dell'atmosfera tra la traccia e il fotorivelatore, che potrebbe essere usata in corrispondenza di eventi osservati nella stessa zona dell'area monitorata.

Una seconda possibilità prevede l'uso di una lampada a flash che potrebbe diffondere luce su tutto il campo di vista del fotorivelatore. Dall'intensità del segnale riflesso misurato e dalla misura del tempo di volo e delle sue variazioni sarebbe possibile avere informazioni sulla trasparenza dell'atmosfera e sulla distanza dal fotorivelatore della superficie riflettente, incluso eventuali nuvole.

2.8 La missione

Il progetto EUSO è stato originariamente proposto all'ESA come missione per un satellite dedicato [19]. Lo studio di fattibilità per una possibile installazione sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS), come proposto dall'ESA, è in corso.

3 Il Programma

La realizzazione di un apparato per osservare dallo spazio la luce di fluorescenza dell'azoto atmosferico indotta da particelle di altissima energia rappresenta una sfida difficile. Questo a causa delle caratteristiche richieste e dei vincoli presenti, che implicano la soluzione di numerosi problemi e l'individuazione di soluzioni non convenzionali. Esistono difficoltà tecniche da superare e la necessità di spingere al limite delle prestazioni diverse tecnologie, in condizioni di limitate risorse e di vincoli stringenti imposti dall'operazione in ambiente spaziale.

Va quindi previsto un intenso programma di R&D che riguarda i sensori, l'integrazione di questi con l'ottica, l'elettronica, l'ingegnerizzazione di tutto il sistema di fotorivelazione e di tutta la struttura complessiva, inclusa l'integrazione con il veicolo spaziale che ospita l'apparato sperimentale.

Una gran parte di questo programma coinvolge direttamente competenze e problematiche, scientifiche e tecnologiche, tradizionalmente proprie dell'INFN e il programma bene si presta ad esportare tali competenze nel settore degli esperimenti di fisica nello spazio.

La partecipazione dell'INFN può dare un contributo sostanziale, qualificato e qualificante, allo sviluppo, progettazione e ottimizzazione del programma AirWatch e alla realizzazione del fotorivelatore per il progetto EUSO.

Questa partecipazione permetterebbe al tempo stesso all'ente di ampliare la propria presenza nel settore degli esperimenti di fisica nello spazio, consolidando competenze, scientifiche e tecnologiche, in un settore d'avanguardia che non gli è tradizionalmente proprio.

Si propone quindi all'INFN un programma di Ricerca e Sviluppo dedicato alla progettazione, ottimizzazione e realizzazione del fotorivelatore e dell'elettronica associata per un esperimento finalizzato all'osservazione dallo spazio della luce di fluorescenza dell'azoto atmosferico indotta da particelle di altissima energia, con particolare riferimento al programma AirWatch e al progetto EUSO.

Il programma, dettagliato nel seguito, dovrebbe svilupparsi temporalmente in quattro fasi:

1. una fase di tests preliminari, necessari alla completa caratterizzazione di tutti gli elementi per capirne gli eventuali limiti ed impostare un'eventuale fase di ricerca e sviluppo;
2. una fase di progettazione ed ottimizzazione, assistita dalle adeguate simulazioni;
3. una fase di realizzazioni di prototipi in scala ridotta e loro uso sia in tests finalizzati alla qualificazione che in misure fisiche rilevanti, in laboratorio ed, eventualmente, in volo in circostanze opportune;
4. una fase finale dedicata allo sviluppo e realizzazione del fotorivelatore per EUSO.

3.1 Obiettivi

Gli obiettivi del programma proposto possono essere sintetizzati nei seguenti punti.

1. Completa definizione delle caratteristiche necessarie ad un rivelatore della luce di fluorescenza dell'azoto dallo spazio, con particolare riferimento al programma Air-Watch e al progetto EUSO.
2. Progettazione del fotorivelatore, che include il sensore (MAPMTs), l'elettronica di front-end, il sistema di raccolta della luce sul sensore, sua ingegnerizzazione ed integrazione del tutto con la struttura di supporto e con il veicolo spaziale.
3. La definizione delle possibili soluzioni di interfacciamento del rivelatore con l'elettronica di read-out.
4. Lo sviluppo e realizzazione di un'elettronica di front-end veloce, a basso consumo, resistente alle radiazioni e ad alta integrazione che soddisfi i requisiti richiesti.
5. La realizzazione e il test di prototipi in scala ridotta del rivelatore di fotoni, finalizzati alla sua qualificazione.
6. Il contributo allo sviluppo e realizzazione del fotorivelatore per EUSO.
7. La partecipazione al programma di simulazione, sia della parte fisica che del fotorivelatore, finalizzato alla progettazione e all'ottimizzazione delle caratteristiche del fotorivelatore.
8. La partecipazione all'analisi fisica dei dati collezionati e al loro studio ed interpretazione.

Nell'ambito del progetto EUSO l'INFN potrebbe contribuire in modo essenziale a tutta la fase di ricerca e sviluppo, progettazione, prototipazione e realizzazione del rivelatore di fotoni, inclusa l'elettronica veloce di front-end, oltre che agli aspetti legati all'analisi fisica dei dati.

Sono infatti questi tutti settori in cui l'INFN ha una solida tradizione, insieme alla potenzialità e capacità di esportare competenze e tecnologie, sia dal punto di vista scientifico che tecnologico, rafforzando al tempo stesso la propria presenza in un settore importante che non gli è tradizionalmente proprio.

3.2 Sviluppo temporale

Lo sviluppo temporale del programma è dettagliato nella tabella 3.2.

Fase	Obiettivo	Item	Periodo
Fase 1	Studio e progetto concettuale; tests preliminari.	MAPMTs, sistema raccolta di luce, elettronica, simulazioni.	01/2001 ÷ 06/2001
Fase 2	Definizione delle specifiche; ottimizzazione e progettazione assistite dalle simulazioni.	Ingegnerizzazione e progettazione del fotorivelatore, progetto preliminare elettronica, simulazioni.	07/2001 ÷ 12/2002
Fase 3	Realizzazione e tests di prototipi; qualificazione delle tecniche; progettazione finale.	Prototipi integrati: fotorivelatore, elettronica e sistema raccolta di luce; simulazioni.	01/2003 ÷ 12/2003
Fase 4	Realizzazione, qualificazione e test del modello di volo.	Realizzazione fotorivelatore completo.	01/2004 ÷ 06/2006

Table 3: Sviluppo temporale

3.3 Competenze

Il tipo di fotorivelatore richiesto e la relativa elettronica di read-out presentano caratteristiche e problematiche affini ad applicazioni tipiche della fisica delle alte energie, quali i rivelatori Ring Imaging CHerenkov (RICH) dei moderni esperimenti, e gli esperimenti agli attuali e futuri acceleratori. A tali problematiche si aggiungono quelle relative alle missioni spaziali e agli esperimenti di fisica nello spazio.

I vari gruppi proponenti possono vantare una solida esperienza nei settori chiave che sono alla base delle problematiche del progetto AirWatch/EUSO, esperienza proveniente

dalla fisica delle alte energie, con e senza acceleratori, dalla fisica dello spazio e dalla astrofisica. Tale aggregazione si rende necessaria data l'interdisciplinarietà del progetto e la necessità di unire competenze diverse.

La linea di ricerca si aggancia alle linee di ricerca del recente passato dei vari gruppi e la complementarità delle competenze dei gruppi proponenti permette la copertura completa di tutti i vari settori del progetto.

3.4 Il Programma di Ricerca

I vari argomenti oggetto del programma sono descritti in dettaglio nel seguito.

3.4.1 Il sensore (MAPMT)

Il sensore che a tutt'oggi risulta essere il più adatto sono i fotomoltiplicatori multi-anodo (MAPMT) della serie R7600 della Hamamatsu. Quindi, pur restando pronti a rispondere ad eventuali nuovi sviluppi nel settore, tale sensore è stato assunto come base.

Il sensore risulta, in base ai dati del costruttore, del tutto adeguato allo scopo. Tuttavia una più completa caratterizzazione delle sue proprietà è indispensabile ai fini della progettazione del fotorivelatore per AirWatch/EUSO e di una adeguata comprensione e ottimizzazione del suo funzionamento.

Occorre quindi in primo luogo avere una completa caratterizzazione delle proprietà del sensore, usando i dati del costruttore ed effettuando le misure che si rendessero necessarie, in particolare quelle che riguardano proprietà rilevanti alla spazializzazione.

- Occorre effettuare una serie di misure per verificare la rispondenza con i dati del costruttore. È opportuno, in particolare, misurare l'efficienza complessiva di rivelazione nella banda spettrale di interesse, il guadagno in funzione della tensione applicata, le variazioni della risposta da pixel a pixel nello stesso MAPMT e le variazioni di guadagno medio tra diversi MAPMTs e la corrente oscura del sensore.
- La stabilità di operazione e l'ageing a lungo termine devono essere determinati con precisione ed affidabilità, al fine di garantire un funzionamento consistente con la durata prevista dell'esperimento EUSO. Determinante a tale scopo è la precisa determinazione del livello di intensità luminosa media a cui saranno sottoposti i MAPMTs, da effettuarsi attraverso uno studio accurato e la simulazione dei fondi, in funzione anche delle caratteristiche dell'orbita e del modo di operazione di EUSO.
- La robustezza meccanica, a shocks e vibrazioni, deve essere verificata al fine di determinare le sollecitazioni massime cui può essere soggetto il fotorivelatore, in particolare in fase di lancio. Tale informazione inoltre è importante nella progettazione

della struttura meccanica globale. A tal fine sono da programmare i tests specifici standard e valutare eventuali modifiche delle proprietà del MAPMT dopo le sollecitazioni.

- Il partitore di tensione deve essere ottimizzato ai fini di permettere l'operazione del MAPMT al minimo consumo possibile senza compromettere la rivelazione del segnale, sia al fine di ridurre la potenza richiesta che al fine di minimizzare la dissipazione del calore prodotto nel partitore di tensione. Varie opzioni esistono, e occorre selezionare la più adatta in funzione del minimo consumo ottenibile, a prestazioni fissate, della semplicità del sistema e della affidabilità e stabilità di operazione.
- Occorre valutare l'eventuale necessità di schermaggio magnetico ed elettrostatico. Mentre il primo sembra essere superfluo, dai dati esistenti, il secondo può essere richiesto a causa dell'impacchettamento dei MAPMTs e della possibilità che diversi MAPMTs vicini siano operati a tensione diversa con connessione in polarità negativa.
- Occorre misurare e valutare attentamente l'incidenza del fenomeno dell'after-pulsing che può influenzare il conteggio dei fotoni e quindi la misura dell'energia dello sciame esteso.
- Occorre valutare a fondo tutti gli aspetti di contaminazione ambientale sia nella fase di lancio che in orbita, quali eventuali esposizioni a plasmi, polveri ed elio, e trovare eventuali contromisure. Nel caso la struttura del fotorivelatore risultasse aperta occorrerebbe considerare i possibili effetti di plasmi e particelle cariche che si potrebbero accumulare sulle varie strutture ed eventualmente prevedere uno schermaggio opportuno. Occorre trovare opportune soluzioni per evitare l'esposizione dei MAPMTs, durante la fase di lancio, a concentrazioni significative di elio, che penetra attraverso il vetro del tubo a vuoto.
- Oltre al cross-talk avente origine nel MAPMT, occorre valutare quello eventualmente originato nella basetta di supporto o nella seguente elettronica di front-end. Questi ultimi due contributi, in particolare, vanno minimizzati con un'opportuna progettazione dei due sistemi in questione.
- In parallelo occorrerà seguire gli sviluppi di sensori alternativi al MAPMT, soprattutto nella prospettiva più a lungo termine del programma AirWatch. Esistono infatti altri tipi di sensori, in particolare Flat Panel PMTs [48] e Hybrid Photon De-

tectors [49], che presentano caratteristiche assai interessanti per l'applicazione considerata, ma che al momento attuale sono ancora in una fase di sviluppo, per quanto molto avanzata. Nel caso questi o altri sensori si rendessero effettivamente disponibili a tempi brevissimi occorrerà valutare i benefici del loro utilizzo in EUSO. Altre possibilità sono poi ipotizzabili in uno scenario a più lungo termine, oltre il progetto EUSO.

3.4.2 *Integrazione del sensore e ingegnerizzazione del fotorivelatore*

L'integrazione del sensore, l'organizzazione e l'ingegnerizzazione della superficie focale presentano numerosi aspetti delicati, che richiedono un accurato progetto e la qualificazione di tutti gli aspetti dello stesso.

1. La basetta di supporto per il sensore ha come primo requisito la necessità di impacchettare i diversi dispositivi nel modo più compatto possibile, onde massimizzare l'accettazione geometrica. Va progettata come modulo elementare che alloggia un certo numero di MAPMTs (ad esempio quattro oppure sedici) e integrabile in una struttura più vasta (i super-moduli) e nel complesso della struttura globale della superficie focale. Inoltre deve prevedere la possibilità di alloggiare il chip VLSI di front-end, più vicino possibile al MAPMT oltre alle connessioni con le alte e basse tensioni e con l'elettronica di read-out. La basetta di supporto deve inoltre prevedere un opportuno sistema per disperdere l'energia dissipata nel partitore di tensione.
2. Elemento importante sono le alimentazioni, una parte assai delicata nella progettazione di tale tipo di esperimenti a causa del gran numero di connessioni di alta e bassa tensione richieste in una struttura estremamente compatta.
3. Occorre valutare l'impatto sull'ingegnerizzazione di un eventuale schermo elettromagnetico per i MAPMTs, nel caso sia richiesto, così come valutare eventuali problemi di compatibilità elettromagnetica e progettare tenendo conto dei vincoli imposti da questi.
4. Le considerazioni strutturali, meccaniche e termiche, quelle elettromagnetiche, in particolare quelle connesse con la compatibilità elettromagnetica, e quelle di sicurezza complessiva vanno incluse nel progetto in modo consistente e integrate con le analoghe considerazioni relative alla struttura di alloggiamento complessiva della superficie focale.
5. Tutto il progetto va affrontato in modo compatibile con i requisiti di operazione nello spazio, in una struttura che deve risultare estremamente compatta e alloggiare, oltre

al sensore e ai suoi componenti accessori, il sistema di raccolta della luce, il sistema di alimentazione di alte e basse tensioni, il partitore di tensione, i circuiti di uscita dei diversi canali e delicati dispositivi elettronici quali il chip di front-end.

6. La progettazione è resa complessa dal gran numero di canali e dalle piccole dimensioni in gioco.
7. Tutto il progetto va ottimizzato in modo da rendere il sistema quanto più possibile *fault tolerant* inserendo le opportune ridondanze, adottando la più opportuna modularizzazione con la massima indipendenza dei moduli diversi e con raggruppamenti che ottimizzino le risorse senza compromettere l'esperimento in caso di problemi ad una parte del fotorivelatore.

3.4.3 *L'elettronica di front-end*

Un punto di partenza per affrontare il problema dello sviluppo dell'elettronica di front-end per il fotorivelatore AirWatch/EUSO è dato dai chips in uso o in fase di sviluppo per esperimenti di fisica delle alte energie. Infatti il tipo di fotorivelatore richiesto per AirWatch/EUSO e la relativa elettronica di read-out presentano caratteristiche e problematiche affini alle moderne applicazioni di fisica delle alte energie. Tali chips, pur necessitando certamente di modifiche, in particolare per ovviare alla mancanza di un trigger esterno, soddisfano già a molte delle caratteristiche richieste. Esistono però alcune ulteriori difficoltà nella presente applicazione legate all'operazione in ambiente spaziale che rende alcune delle caratteristiche ancora più stringenti rispetto a quanto richiesto in fisica delle alte energie, in particolare limitazioni di massa, spazio e potenza disponibile.

Occorrerà affrontare i problemi specifici dell'uso e del read-out dei fotomoltiplicatori multianodo nel contesto di AirWatch/EUSO, tenendo conto delle caratteristiche e vincoli esistenti, ed adattare, ovvero progettare ex-novo, realizzare e testare il chip relativo.

Tale impostazione permetterà di sfruttare al massimo risultati e competenze già esistenti in applicazioni simili, tentando di esportarli alla presente applicazione.

3.4.4 *Il sistema di raccolta della luce sul sensore*

Il sistema di raccolta di luce costituisce un elemento integrante del fotorivelatore e della superficie focale che va inserito nella struttura complessiva. In parallelo all'ingegnerizzazione meccanica dello stesso occorre procedere alla sua ottimizzazione, che non può prescindere da una completa simulazione ed ottimizzazione dell'ottica nel suo complesso. Solo la valutazione del sistema ottico complessivo, obiettivo e collettore di luce sulla superficie focale, può fornire l'ottimizzazione delle prestazioni. Occorrerà quindi

studiare ed ottimizzare tutto il sistema ottico, sia nella configurazione di base per EUSO sia valutando eventuali soluzioni alternative, come un sistema catadiottrico.

L'ottimizzazione riguarda però non solo le prestazioni ottiche ma anche la valutazione dell'impatto nel progetto complessivo, in particolare in termini di massa e di generazione di background. Nel caso del collettore di luce poi occorre valutare il suo possibile utilizzo come supporto per il filtro ottico.

Occorrerà valutare se sistemi di raccolta di luce alternativi e più efficaci rispetto alla semplice lente semisferica, quali sistemi basata su guide di luce coniche, possono essere sviluppati e portati in fase realizzativa in tempi compatibili con quelli richiesti.

3.4.5 I prototipi

Il sistema completo di fotorivelazione va testato nella sua interezza fatto che implica la realizzazione e il test in laboratorio di prototipi in scala ridotta, ma funzionalmente equivalenti al fotorivelatore completo. Occorrerà verificare in tal modo la completa rispondenza alle specifiche, vista anche la impossibilità, o comunque la grande difficoltà, di accesso al fotorivelatore EUSO in orbita.

Occorrerà prendere in considerazione la possibilità di eventuali lanci preliminari di prototipi in scala ridotta, ad esempio come carico aggiunto su opportuno satellite, qualora si rendessero disponibili opportunità in tal senso.

In ogni caso saranno da effettuare lanci in pallone e/o voli su aerei di alta quota con un duplice obiettivo: la verifica delle prestazioni e della rispondenza alle specifiche del fotorivelatore e misure del background più precise e complete di quelle esistenti.

I prototipi saranno sottoposti a tutti i tests necessari per qualificarne il loro uso, incluse le prove di spazializzazione.

3.4.6 Simulazioni e analisi dei dati

In parallelo all'attività di ricerca, sviluppo e progettazione, e come suo indispensabile supporto, occorre sviluppare tutte le simulazioni necessarie allo sviluppo, progettazione ed ottimizzazione del fotorivelatore. Questo include sia la parte di simulazione del processo fisico, e soprattutto del background atteso, che la simulazione dell'ottica, del fotorivelatore e di tutta la catena elettronica, in particolare del sistema di trigger. Il tutto è indispensabile ai fini dell'ottimizzazione del progetto, dati i numerosi vincoli presenti e le numerose caratteristiche richieste.

Occorre dunque studiare e simulare la generazione della luce di fluorescenza nell'atmosfera, la sua propagazione fino al fotorivelatore attraverso l'atmosfera e la relativa attenuazione, e la sua osservazione da parte del fotorivelatore. Questo include sia la sim-

ulazione dell'ottica di raccolta della luce, del fotosensore e del sistema di trigger necessario a riconoscere gli eventi interessanti dal fondo e di tutta la catena elettronica, fino alla trasmissione dei dati a Terra, che va effettuata nel modo più efficiente possibile. Il fondo include le emissioni di luce ultravioletta della Terra (come luci artificiali, luminescenze terrestri e marine, etc.) e dell'atmosfera (come lampi, meteore, aeroplani, etc.). Occorre inoltre studiare e simulare gli effetti dell'ambiente sul fotorivelatore, quali la produzione di luce Cherenkov nelle varie componenti ottiche e gli effetti delle radiazioni e campi elettromagnetici.

Scopo finale di tutto il lavoro di simulazione sarà di determinare le potenzialità osservative dell'esperimento, ottimizzarne il progetto e valutarne le prestazioni.

Occorrerà mettere a punto e ottimizzare la catena di analisi dei dati tenendo conto della necessità di avere un trigger veloce e selettivo. Data la limitata possibilità di trasferimento dei dati a Terra una gran parte dell'analisi andrà effettuata a bordo con la conseguente necessità di elaborare un sistema di analisi efficace ed affidabile.

3.5 Richiesta di finanziamento all'INFN

Si propone che la ricerca e sviluppo, la progettazione e la realizzazione del fotorivelatore e dell'elettronica associata per il progetto EUSO siano sotto la responsabilità dell'INFN. È questo un argomento ben definito e delimitato, consistente con le linee di ricerca proprie dell'INFN e con le competenze e tradizioni che l'INFN può mettere in gioco. Inoltre darebbe all'ente un ruolo essenziale nel progetto.

All'INFN si intende quindi chiedere un contributo finanziario per la parte di ricerca e sviluppo, progettazione e realizzazione del fotorivelatore e dell'elettronica associata per il progetto EUSO.

Gli argomenti che saranno oggetto della richiesta di finanziamento, nell'ambito del progetto EUSO, si possono classificare come segue.

- Sviluppo, progettazione, prototipazione e realizzazione della basetta di supporto per i MAPMTs e componenti accessori.
- Sviluppo e realizzazione del sistema di alimentazioni di alte e basse tensioni per il fotorivelatore.
- Sviluppo e realizzazione del sistema di raccolta di luce sul fotorivelatore.
- Sviluppo e realizzazione dell'elettronica di front-end.
- Sviluppo e realizzazione della struttura della superficie focale e sua organizzazione e integrazione con la struttura di supporto e con il resto del veicolo spaziale.

- Realizzazione e tests dei prototipi in scala ridotta del fotorivelatore o di parti di esso. Incluso il test in volo: su pallone, aereo di alta quota o anche, eventualmente, come carico aggiunto (a costo nullo) su satellite.
- Strumentazione di laboratorio necessaria al programma approvato.

Lo sviluppo temporale di tali richieste va parallelamente a quello del progetto, e sono quindi distribuite dal momento dell'eventuale approvazione fino al 2005.

4 Il progetto EUSO

EUSO è una realizzazione del concetto AirWatch, proposto il 31 gennaio 2000 in risposta al bando dell'ESA per le missioni F2/F3. Il progetto è stato giudicato in modo molto positivo dal punto di vista scientifico e l'ESA ha raccomandato, nel marzo 2000, uno studio di accomodamento sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Le valutazioni sono disponibili in [66].

4.1 Collaborazioni

La collaborazione EUSO consiste di membri di 26 istituzioni: istituti di ricerca e Università di paesi europei afferenti all'ESA, Università e centri NASA degli USA e gli istituti RIKEN e NASDA giapponesi.

4.2 Finanziamenti

Il costo di tutta la parte legata al veicolo spaziale, alla messa in orbita, alle operazioni in orbita e aspetti collegati è a carico dell'ESA, con un'eventuale quota da parte della NASA e del NASDA.

I costi dell'apparecchiatura scientifica (il *payload* scientifico) sono a carico delle istituzioni e delle agenzie nazionali afferenti all'ESA o alle altre agenzie nel caso di paesi non-ESA. Per quanto riguarda l'Italia l'agenzia di riferimento è l'ASI.

I dettagli si trovano nella proposta EUSO allegata.

References

- [1] J. Linsley, Phys. Rev. Lett. 10 (1963) 146.
- [2] M. A. Lawrence, R. J. O. Reid and A. A. Watson, J. Phys. G 17 (1991) 773.

- [3] N. N. Efiomov et al., Proc. International Symposium on *Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Rays*, eds. M. Nagano and F. Takahara, World Scientific, Singapore (1991) pag. 20.
- [4] D. J. Bird et al., Fly's Eye Collaboration, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 71;
D. J. Bird et al., Fly's Eye Collaboration, Astrophys J. 441 (1995) 144.
- [5] M. Takeda et al., Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1163.
- [6] D. Kieda et al., HiRes Collaboration, Proc. 26th ICRC, Salt Lake City (1999).
- [7] P. P. Kronberg, Rep. Prog. Phys., 57 (1994) 325;
J. P. Vallée, Fundamentals of Cosmic Physics, 19 (1997) 1.
- [8] P. Blasi, S. Burles and A. V. Olinto, Astrophys. J. 512 (1999) L79.
- [9] D. Ryu, H. Kang, P. L. Biermann, Astron. Astrophys. 335 (1998) 15.
- [10] G. Sigl, M. Lemoine, P. Biermann, Astropart. Phys. 10 (1999) 141.
- [11] M. Ambriola et al., AirWatch Collaboration, *Extreme energy cosmic rays (EECR) observation capabilities of an "AirWatch from space" mission*, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 70 (1999) 515-517.
- [12] X. Bertou, M. Boratav and A. Letessier-Selvon, *Physics of Extremely High Energy Cosmic Rays*, astro-ph/0001516, Submitted to International Journal of Modern Physics A.
- [13] G. Sigl, P. Bhattacharjee, *Origin and Propagation of Extremely High Energy Cosmic Rays*, astro-ph/9811011 and Phys. Rept. 327 (2000) 109-247.
- [14] A. V. Olinto, *Ultra High Energy Cosmic Rays: The theoretical challenge*, astro-ph/0002006 and to be published in the David Schramm Memorial Volume of Physics Reports.
- [15] S. Yoshida and H. Dai, *The Extremely High Energy Cosmic Rays*, J. Phys. G24 (1998) 905-938.
- [16] R. M. Baltrusaitis et al., Fly's Eye Collaboration, Nucl. Instr. and Meth. A240 (1985) 410.
- [17] T. Abu-Zayyad et al., HiRes Collaboration, Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, 5 (1999) 349.

- [18] The Pierre Auger Project Design Report, Second Edition, Revised marzo 1997, Fermilab. Available at:
<http://www.auger.org/admin/DesignReport/index.html> .
- [19] The AirWatch/OWL Collaboration,
EUSO: Extreme Universe Space Observatory. An Explorative Mission Probing the Extremes of the Universe using the Highest Energy Cosmic Rays and Neutrinos.
 A Proposal for the ESA F2/F3 Missions, sottomesso all'ESA, 31 gennaio 2000.
 Documento allegato.
- [20] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. 16 (1966) 748;
 G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin, Sov. Phys. JETP Lett. 4 (1966) 78.
- [21] A. M. Hillas, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 22 (1984) 425.
- [22] J. L. Puget, F. W. Stecker, J. H. Bredekamp, Astrophys. J. 205 (1976) 638;
 F. W. Stecker, M. H. Salamon, Astrophys. J. 512 (1999) 521.
- [23] V. S. Berezinsky, Yad.Fiz. 11 (1970) 339;
 R. J. Protheroe and P.L.Biermann, Astropart.Phys. 6 (1996) 45; erratum ibid. 7 (1997) 181.
- [24] G. Sigl, S. Lee, D. Schramm and P.Bhattacharjee, Science 270 (1995) 1997.
- [25] V. S. Berezinsky, AIP CP433 (1998) 279.
- [26] P. L. Biermann, AIP CP433(1998) 22.
- [27] M. Milgrom and V. V. Usov, Astrophys. J., 449:L37 (1995);
 Astropart. Phys., 4 (1995) 365.
- [28] E. Waxmann, Astrophys. J. 452 (1995) 1.
- [29] M. Vietri, Astrophys. J., 453 (1995) 883;
- [30] M. Vietri, Phys. Rev. Lett. (1997).
- [31] T. Tajima and Y. Takahashi, Astrophys. J. Suppl. (in press) (1999).
- [32] Y. Takahashi, L. Hillman and T. Tajima, *High Field Science*, "Plenum", (1999).
- [33] P. Meszaros, Proc. 4th Huntsville Symposium (1997);
- [34] E. Waxman and J. Bahcall, Phys. Rev. Lett., 78 (1997) 2293;

- [35] W.L.Boeck et al.,*Geophys.Res.Lett.*,19(1992)99-102;
- [36] W.L.Boeck et al.,*J.Geophys.Res.*,100(1995)1465;
- [37] J.D.Everet,*Nature*,68(1903)699;
- [38] A.V.Gurevitch et al.,*Phys.Lett.*,A-165(1992)463;
- [39] Y.Taranenko and R.Roussel-Dupré,*Geophys.Res.Lett.*,23(1996)571;
- [40] Y.Taranenko,U.S.Inan,T.F.Bell,*Geophys.Res.Lett.*,20(1993)2675;
- [41] N.Chiba et al.(AGASA Collaboration),*Nucl.Instr. and Meth. A*311 (1992) 338;
- [42] Un chiaro riassunto delle proprietà dei EAS si trova in: P.Sokolsky, *Introduction to Ultra High Energy Cosmic Ray Physics* (Addison Wesley, 1989), Cap.3.
- [43] A.M.Hillas,*J.Phys. G: Nucl. Phys.* 8 (1982) 1461;
- [44] B.Sacco, O.Catalano, M.C.Maccarone, L.Scarsi and M.Vietri, Proc. 26th ICRC,2(1999)392;
- [45] M.C.Maccarone,O.Catalano,S.Giarrusso,and B.Sacco, Proc. 26th ICRC,5(1999)445;
- [46] Y. Takahashi, private communication.
- [47] K. Arisaka, *Optimization of OWL-AirWatch Optics & Photo-Detectors*, 28 December 1999, unpublished. Available at:
http://www.physics.ucla.edu/~arisaka/owl/arisaka_owl.doc .
- [48] Flat Panels PMTs, Hamamatsu Photonics, private communication.
- [49] T. Gys et al, *Nucl. Instr. and Meth. A*355 (1995) 386;
 G. Anzivino et al., *Nucl. Instr. and Meth. A*365 (1995) 76;
 R. DeSalvo, *Nucl. Instr. and Meth. A*387 (1997) 92;
 E. Chesi et al., *Nucl. Instr. and Meth. A*387 (1997) 122.
- [50] F. Filthaut, *Large-area hybrid photodiodes with enclosed VLSI read-out electronics*, Beaune'99, June 21-25, 1999. Submitted to NIM A.
- [51] T. Gys, *Performance of hybrid photon detectors with 80 for the RICH counters of LHCb*, Beaune'99, June 21-25, 1999. Submitted to NIM A.

- [52] The LHCb RICH Collaboration, private communication.
- [53] Multi-anode photomultiplier tube R5900/R7600, Hamamatsu Photonics.
- [54] Hamamatsu Photonics, private communication.
- [55] N. Mahne, Tesi di laurea, Trieste, 1999.
- [56] AMS: Alpha Magnetic Spectrometer.
- [57] V. Gracco and A. Petrolini, *Use of multi-anode photomultipliers for the AirWatch photon detector*, 23 October 1998, AirWatch technical note, Available at:
<http://www.ge.infn.it/~petrolin/aw/mapmt.ps>
- [58] Laser Focus World, 12/95.
- [59] GDE s.r.l., via Faurer 4, Novara, I-28100, Italy
- [60] F. G. Sciacca et al., *Readout of MICRO Strip Gas Chambers for the CMS central tracker with the APV6 front-end chip*, Proceedings of the 4th Workshop on Electronics for LHC Experiments, CERN/LHCC/98-36, 30 ottobre 1998.
- [61] W. Dabrowski et al., *The ABCD binary readout chip for silicon strip detectors in the ATLAS silicon tracker*, Proceedings of the 4th Workshop on Electronics for LHC Experiments, CERN/LHCC/98-36, 30 ottobre 1998.
- [62] *Description of the PMT readout board for the AURORA project*, IDE-AS Internal Report, Marzo 2000
- [63] *Strumento per la misura del background del cielo notturno e dell'aurora nelle bande UV*, Proposta all'ASI per l'perimento AURORA sul satellite MegSat-1, Settembre 1999.
 MegSat1, Le scienze, luglio 1999.
- [64] O. Catalano et al., Proc. SPIE 3445, 478 (1998);
 O. Catalano, Proc. 26th ICRC 2, 407 (1999) e 2, 411 (1999);
 S. Giarrusso et al., Proc. 26th ICRC 5, 449 (1999).
- [65] O. Catalano et al., *The atmospheric nightglow in the 300 ÷ 400 nm wavelength, results by the balloon-borne experiment BABY*, Sottomesso ad Astroparticle Physics, 1999.

[66] Available at:

http://sci.esa.int/content/doc/62/14690_.htm

http://spdext.estec.esa.nl/content/doc/5e/14686_.htm

http://spdext.estec.esa.nl/content/doc/76/14710_.htm