

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA**

**DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA**

**DOTTORATO INTERNAZIONALE DI RICERCA IN**

**“NUCLEAR AND PARTICLE ASTROPHYSICS” XXVII CICLO**

---

**DOTT. GIOVANNI CONTINO**

**Il Progetto EUSO@TurLab:  
Riproduzione Sperimentale delle Orbite della Stazione  
Spaziale Internazionale per la Missione JEM-EUSO**

---

**TESI DI DOTTORATO DI RICERCA**

---

**Tutor: Chiar.ma Prof.ssa R. Caruso  
Chiar.mo Prof. M. Bertaina**

---

**ANNO ACCADEMICO 2013-2014**

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>III</b>
<b>1 Fisica dei Raggi Cosmici</b>	<b>1</b>
1.1 Raggi Cosmici di Energia Estrema . . . . .	3
1.1.1 Spettro dei Raggi Cosmici . . . . .	4
1.1.2 Meccanica di propagazione . . . . .	7
1.1.3 Il cut-off GZK . . . . .	11
1.2 Sciami estesi in aria . . . . .	14
1.3 Tecniche sperimentali di rivelazione dei raggi cosmici . . . . .	21
1.3.1 Rivelatori di Superficie . . . . .	21
1.3.2 Rivelatori di Fluorescenza . . . . .	24
<b>2 Il progetto JEM-EUSO</b>	<b>27</b>
2.1 Osservatori di raggi cosmici di energia estrema . . . . .	28
2.2 Il telescopio JEM-EUSO . . . . .	34
2.2.1 Caratteristiche Tecniche . . . . .	37
2.2.2 Trigger di primo livello . . . . .	43
2.2.3 Scopi . . . . .	47
2.3 Precursori prototipi di JEM-EUSO . . . . .	54
2.3.1 EUSO-Balloon . . . . .	54
2.3.2 EUSO-TA . . . . .	55
2.3.3 Mini-EUSO . . . . .	56

<b>3</b>	<b>Il Progetto EUSO@TurLab</b>	<b>58</b>
3.1	TurLab . . . . .	59
3.1.1	Prototipo . . . . .	60
3.1.2	Elettronica . . . . .	62
3.1.3	Vasca Rotante . . . . .	66
3.2	Set-Up Sperimentale . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Misure e Analisi Dati</b>	<b>77</b>
4.1	Prima campagna di misure . . . . .	78
4.2	Seconda campagna di misure . . . . .	83
4.3	Terza campagna . . . . .	88
4.4	Quarta campagna di misure . . . . .	89
4.5	Quinta campagna di misure . . . . .	95
4.6	Sesta campagna di misure . . . . .	100
4.7	Settima campagna di misure . . . . .	105
4.8	Ottava campagna di misure . . . . .	108
4.9	Nona campagna di misure . . . . .	112
4.10	Decima campagna . . . . .	122
4.11	Undicesima campagna di misure . . . . .	126
<b>5</b>	<b>Discussione e Sviluppi futuri</b>	<b>131</b>
5.1	Discussione dei risultati ottenuti . . . . .	131
5.2	Conclusioni . . . . .	142
5.3	Sviluppi futuri . . . . .	143
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>145</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>146</b>

# Introduzione

Il progetto EUSO@TurLab è un'attività in fase di sviluppo, mirata alla riproduzione di condizioni atmosferiche e luminose che il telescopio JEM-EUSO registrerà nelle sue orbite sulla Stazione Spaziale Internazionale intorno alla Terra. L'uso della struttura TurLab, situata al Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Torino, permette la simulazione di un vasto numero di eventi dell'atmosfera terrestre in un ambiente in cui è possibile creare condizioni di luce controllata e, grazie all'uso di una vasca rotante, riprodurre la rotazione del telescopio JEM-EUSO e verificare la risposta dei sensori e della sensibilità di quest'ultimo. Il set-up sperimentale attualmente in uso è stato utilizzato per verificare il potenziale del laboratorio TurLab per gli scopi suddetti ed i dati acquisiti sono stati usati per certificare l'algoritmo di trigger di JEM-EUSO.

Nel presente lavoro di tesi verranno approfonditi la teoria alla base ed i risultati ottenuti.

Nel Capitolo 1 vengono trattati la fisica dei raggi cosmici di energia estrema, cui la missione JEM-EUSO è dedicata, gli sciami estesi in aria e le tecniche sperimentali di rivelazione usate.

Nel Capitolo 2 viene presentato il progetto JEM-EUSO, descrivendone le caratteristiche tecniche e gli scopi della missione, inserita nel contesto degli osservatori di raggi cosmici di energia estrema del passato e del presente; inoltre verrà trattato il funzionamento dell'algoritmo di trigger di primo livello.

Il Capitolo 3 è dedicato alla presentazione del progetto EUSO@TurLab, con la descrizione dell'apparato sperimentale utilizzato nel corso di varie campagne di

misura.

Nel Capitolo 4 vengono elencate le misure effettuate e l'analisi dei dati; esso è strutturato come un “diario di bordo”, sia per l'ingente quantità di dati acquisiti, sia per memoria storica, al fine di servire per esperienze future.

Infine il Capitolo 5 presenta i risultati dell'attività di ricerca eseguita (da cui sono scaturite una presentazione al “XV International Meeting of the JEM-EUSO Collaboration”, una presentazione al “100° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica”, la stesura di un contributo agli Atti della Conferenza internazionale “ATMOHead 2014” (Bertaina *et al.*, 2014a [18]) e di un articolo sul trigger in fase di sottomissione alla rivista scientifica internazionale con referee NIM A (Bertaina *et al.*, 2014b [19]).

# Capitolo 1

## Fisica dei Raggi Cosmici

Il tema dei raggi cosmici è molto vasto e profondamente correlato a svariati campi della fisica, spaziando dall'astronomia alla fisica nucleare e alla fisica delle particelle elementari. Questa branca trae le sue origini dalle osservazioni e dalle misure sui raggi cosmici effettuate nella prima metà del XIX secolo, dalla scoperta del positrone, nel 1932, a quella del  $\Sigma^+$ , nel 1953. Oggi, che la fisica degli acceleratori ha compiuto enormi passi in avanti, rimangono aperte molte questioni riguardanti i raggi cosmici primari, in particolar modo per le energie estremamente alte.

I principali punti interrogativi di interesse astrofisico possono essere riassunti nel fatto che, circa un secolo dopo la scoperta dei raggi cosmici, non si hanno modelli definitivi circa la loro origine, l'accelerazione ed i processi di propagazione, anche se essi portano informazioni sull'Universo, non solo ristretto alla nostra Galassia, ma probabilmente anche sullo spazio extragalattico, almeno per quanto riguarda le energie più alte. Di particolare importanza è la questione della loro accelerazione, in quanto le osservazioni attuali mostrano che la quantità di efficienza fornita nel trasferimento di energia ai raggi cosmici nel loro percorso dalla sorgente a Terra è eccezionalmente elevata, soprattutto se comparata con le teorie accreditate. Molti oggetti astrofisici sono stati considerati candidati per gli acceleratori cosmici: dai resti di SuperNovae (SN) ai sistemi di stelle binarie, dalle Radiogalassie ai Nuclei Galattici Attivi (AGN). Oltre ciò, si discute anche del possibile

ruolo giocato dai resti delle imperfezioni topologiche nelle prime fasi dell'Universo, stabilendo così possibili connessioni tra i raggi cosmici e la cosmologia.

## 1.1 Raggi Cosmici di Energia Estrema

Sorvolando sulla trattazione storicamente completa della scoperta e comprensione della natura dei raggi cosmici (per cui si rimanda a: Rossi, 1952 [57], Hillas, 1972 [35], Longair, 1981 [45], Sokolosky, 1988 [61], Gaisser, 1990 [30]), ricordiamo qui che i primi passi compiuti nel XIX secolo sono stati:

- il riconoscimento che i raggi cosmici sono di origine extra-terrestre;
- la comprensione che solo una piccola parte di quelli rivelati a terra sono di origine solare;
- la comprensione che i raggi cosmici rivelati a terra ( $\mu^\pm$ ,  $e^\pm$ ,  $\gamma$ , alcuni adroni e molti neutrini) sono “raggi cosmici secondari”, derivanti dall’interazione dei “raggi cosmici primari” con l’atmosfera terrestre.

Una delle caratteristiche chiave dei raggi cosmici è il loro spettro energetico (che sarà trattato nel ¶ 1.1.1), che si estende su vari ordini di grandezza in energia. A tal proposito, la terminologia usata per i diversi intervalli energetici dei raggi cosmici è la seguente (Battistoni & Grillo, 2002 [9]):

- raggi cosmici di energia elevata (High Energy Cosmic Rays - HECRs), nella regione del  $GeV$  ( $1 GeV = 10^9 eV$ );
- raggi cosmici di energia molto elevata (Very High Energy Cosmic Rays - VHECRs), nella regione del  $TeV$  ( $1 TeV = 10^{12} eV$ );
- di energia ultra-elevata (Ultra High Energy Cosmic Rays - UHECRs), nella regione del  $PeV$  ( $1 PeV = 10^{15} eV$ );
- raggi cosmici di energia estremamente elevata (Extreme Energy Cosmic Rays - EECRs), nella regione del  $EeV$  ed oltre ( $1 EeV = 10^{18} eV$ ).

Dal punto di vista sperimentale esistono eventi misurati fino a  $10^{20} eV$ , corrispondenti ad un flusso di  $\sim 1 \cdot km^{-2} \cdot \text{millennio}^{-1}$  e sono questi gli eventi cui ci si rivolge in questo lavoro.

### 1.1.1 Spettro dei Raggi Cosmici

Gli spettri energetici dei raggi cosmici possono essere espressi come flusso differenziale (numero di particelle nell'intervallo  $E$ ,  $E + dE$ ) o flusso integrale (numero di particelle con energia maggiore o uguale ad  $E$ ).

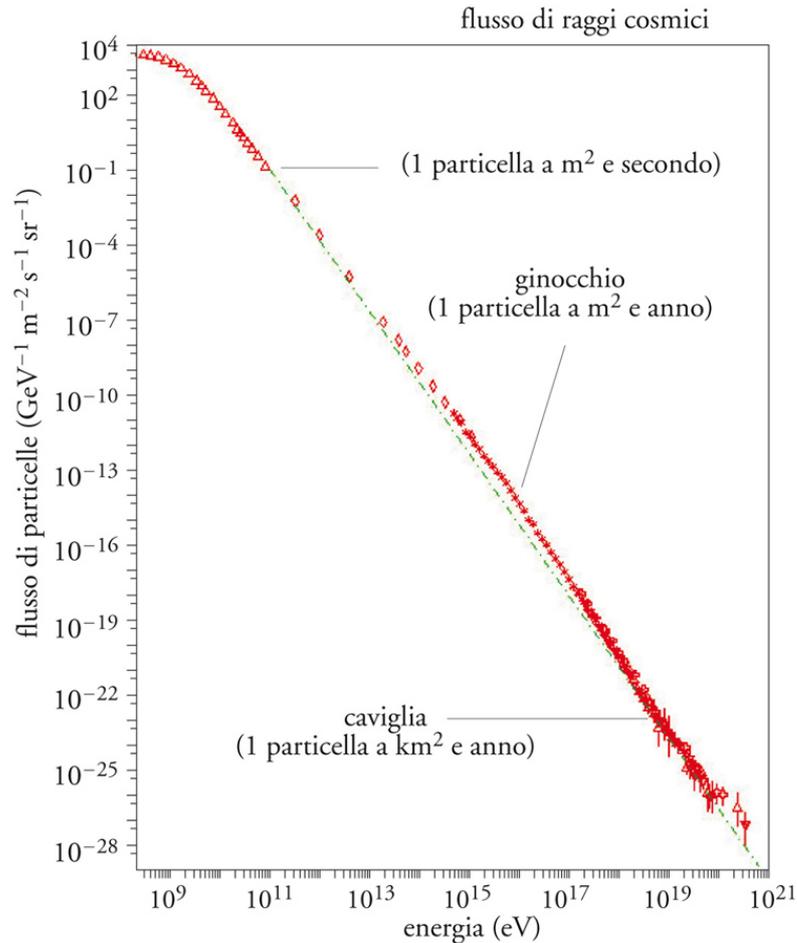


Figura 1.1: Lo spettro differenziale dei raggi cosmici, ovvero il numero di particelle per unità di energia, unità di superficie, unità di tempo e unità di angolo solido in funzione dell'energia, con l'indicazione dei flussi caratteristici e delle zone note come “ginocchio” e “caviglia”.

Nella Figura 1.1 è possibile osservare lo spettro differenziale in funzione dell'energia. L'intervallo energetico sotto i 10  $GeV$  è condizionato dalla modulazione solare, mentre ad energie più alte le particelle sono più “rigide” e tali effetti magnetici “locali” possono essere trascurati. La zona ad alta energia esibisce un

comportamento estremamente regolare e, nonostante siano coinvolti differenti processi fisici nella produzione, accelerazione e trasporto dei raggi cosmici, sembra che essi agiscano in modo tale da produrre un spettro di potenza “dolce”, del tipo  $E^{-\gamma}$  su undici ordini di grandezza (da  $10^9$  eV a  $10^{20}$  eV). Lo spettro differenziale può essere ben approssimato dalla funzione:

$$\frac{dN}{dE} = 1.8 (E/GeV)^{-2.7} [\text{nucleoni}/m^2 \cdot sr \cdot s \cdot (GeV/A)]$$

almeno al di sotto delle energie del  $PeV$ . Vi sono poi alcune caratteristiche peculiari ma ben definite che rompono tale apparente regolarità: nella regione del  $PeV$  si trova un “ginocchio” dove l’indice spettrale  $\gamma$  cambia da  $\sim 2.7$  a  $\sim 3.0 \div 3.1$ . A circa  $10^{19}$  eV lo spettro sembra appiattirsi nuovamente, determinando la cosiddetta “caviglia”. Sia il ginocchio che la caviglia sono considerati come importanti indizi nella comprensione dei processi fisici all’origine dei raggi cosmici primari.

Conoscendo il flusso, possiamo definire una densità di energia dei raggi cosmici, assumendo che siano distribuiti uniformemente ed isotropicamente nella regione di spazio attorno a noi (la nostra Galassia).

$$\rho = \frac{4\pi N(\geq E)}{\beta c} \approx 1 \text{ eV}/cm^3$$

Considerando che la densità di energia della luce stellare è circa  $0.6 \text{ eV}/cm^3$  e quella del campo magnetico galattico (il cui valor medio è circa  $3 \mu G$ ) è  $0.26 \text{ eV}/cm^3$  si può quindi capire come i raggi cosmici partecipino in larga parte all’energia totale disponibile attorno a noi.

La discussione su dove sia il punto di interruzione di questo spettro con legge di potenza può essere tracciata indietro di 50 anni, poco dopo la scoperta della radiazione cosmica di fondo ed è nota come effetto GZK (acronimo di Greisen-Zatsepin-Kuzmin, descritto nel ¶ 1.1.3), che porta ad una lunghezza di attenuazione di  $\sim 50 \text{ Mpc}$  per un protone di  $10^{20}$  eV. La scala di 50 Mpc è circa pari alla scala del piano supergalattico che circonda l’Ammasso della Vergine,

cui la nostra Galassia appartiene ed è solo una piccola frazione della scala totale dell'Universo visibile.

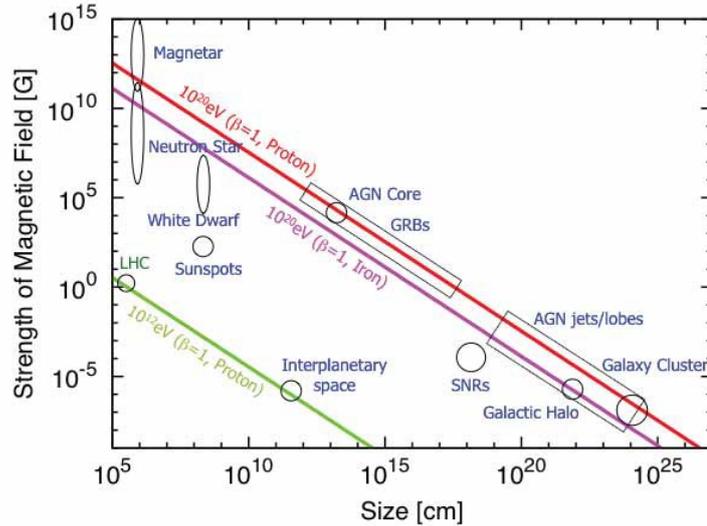


Figura 1.2: Diagramma di Hillas che mostra i limiti teorici superiori per l'energia della particella, determinati dall'intensità del campo magnetico e dalle dimensioni di alcuni oggetti celesti possibili sorgenti acceleratrici di raggi cosmici di energia elevata.

L'energia più elevata ottenibile dalle particelle all'interno di una data sorgente è determinata dal prodotto tra la grandezza della regione di accelerazione e l'intensità del suo campo magnetico (vedi Figura 1.2). Sono pochi gli oggetti celesti noti che soddisfano la condizione di accelerazione fino a  $10^{20}$  eV: stelle di neutroni con un campo magnetico estremamente intenso (più grande di  $10^{12} - 10^{13}$  G), getti di nuclei galattici attivi (AGNs), gamma-ray bursts (GRBs), radio galassie e ammassi di galassie. Tutte queste sorgenti sono allineate lungo il limite superiore teorico all'energia di  $10^{20}$  eV (come schematizzato nel diagramma di Hillas in Figura 1.2). Inoltre le perdite di energia sono inevitabili a causa dell'interazione con fotoni della radiazione cosmica di fondo e campi magnetici, che diminuiscono ulteriormente l'intervallo di sorgenti astrofisiche candidate. A meno che siano scoperti nuovi oggetti astrofisici o meccanismi di accelerazione, è verosimile che lo

spettro di particelle di energia estrema mostri un limite di accelerazione attorno a  $10^{20}$  eV. Se un limite di accelerazione non è visibile nello spettro, c'è una forte possibilità che possano esistere nuovi oggetti astronomici sconosciuti posizionati nella regione vuota (nell'angolo in alto a destra) del diagramma di Hillas. Non ci sono ragioni teoriche per l'assenza di tali oggetti.

Negli scenari Top-Down (“dall'alto verso il basso”), gli EECRs non vengono accelerati acquisendo energia sempre più elevata - come previsto negli scenari Bottom-Up (“dal basso verso l'alto”) - ma vengono generati già ad energie elevatissime negli istanti primordiali dell'Universo o come particelle frutto del decadimento o dell'annichilazione di particelle “relitto” del Big Bang, Particelle Super-Massive (SHPs:  $m \sim 10^{22} - 10^{25}$  eV/ $c^2$ ), ecc. I prodotti finali di questo processo sono ben studiati: neutrini e raggi gamma sono abbondanti rispetto ai nucleoni, di un fattore tra due e tre (Berezinsky *et al.*, 1997 [13] e Aloisio *et al.*, 2004 [3]). Lo spettro di energia è dell'ordine di  $E^{-1.9}$  (Sakar *et al.*, 2002 [58], Berezinsky *et al.*, 2001 [16], Birkel *et al.*, 1998 [20] e Barbot *et al.*, 2003 [8]).

### 1.1.2 Meccanica di propagazione

L'abbondanza chimica degli elementi nei raggi cosmici è nota, almeno fino a qualche decina di  $TeV/nucleone$ , dai risultati delle osservazioni effettuate ad altitudini elevate o nello spazio. È stato rivelato un accordo generale con le abbondanze trovate nel Sistema Solare, con l'eccezione di alcuni nuclei, estremamente rari nell'evoluzione stellare ma più abbondanti nei raggi cosmici. La spiegazione della presenza di tali nuclei deriva dalla loro interpretazione come prodotti secondari di processi di spallazione nucleare che avvengono nelle interazioni di nuclei più pesanti con i protoni del mezzo interstellare, la cui densità  $\rho_{ISM}$  è circa pari a 1 atomo di idrogeno /  $cm^3$ . Il problema è però capire qual'è la quantità di materiale che i raggi cosmici devono incontrare affinché producano le abbondanze osservate di nuclei secondari, senza svuotare troppo l'abbondanza dei primari stessi. L'evoluzione delle abbondanze può essere descritta dalle equazioni del trasporto che,

una volta risolte, portano al rapporto tra abbondanza secondaria e primaria in funzione della quantità di materiale incontrato:

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{P_{sp}\lambda_s}{(\lambda_s - \lambda_p)} \left[ \exp\left(\frac{X_{sp}}{\lambda_p} - \frac{X_{sp}}{\lambda_s}\right) - 1 \right]$$

dove  $N_p$  e  $N_s$  sono le specie primarie e secondarie,  $P_{sp}$  è la probabilità di produrre un nucleo secondario dalla spallazione di un primario,  $\lambda_i$  è la lunghezza di interazione della specie  $i$  e  $X_{sp}$  è l'ammontare di materiale incontrato in  $g/cm^2$ . Questa equazione esprime solo una approssimazione, in assenza di dipendenze temporali e presenza di più di due specie, ma è sufficiente per ottenere importanti risultati. Il valore ottenuto per  $X_{sp}$  permette di stimare la lunghezza totale di spazio (e tempo) che un raggio cosmico deve percorrere tra la sorgente e l'arrivo sulla Terra, assumendo che sia confinato nella nostra Galassia. Note le dimensioni della nostra Galassia (spessore di  $\sim 300 pc$ ), si arriva al risultato che i raggi cosmici devono percorrere circa  $1 Mpc$ , corrispondente ad un tempo di confinamento di circa  $3 \cdot 10^6$  anni, che è molto più lungo del tempo necessario per attraversare in linea retta lo spessore del disco galattico.

Riassumendo, è possibile immaginare il seguente scenario:

- alcune particelle (nuclei) vengono prodotte ed accelerate da qualche parte;
- esistono dei meccanismi che confinano tali particelle accelerate in un volume di confinamento, da identificare possibilmente con la nostra Galassia;
- durante la fase di propagazione, queste particelle producono le abbondanze osservate di elementi leggeri, tramite interazioni con la materia interstellare.

Considerando che la Galassia ha un suo campo magnetico di circa  $3 \mu G$  che si muove con il plasma (gas di particelle ionizzate) di cui è composto il mezzo interstellare, le particelle cariche che la attraversano effettuano un percorso casuale, essendo effettivamente confinate, e ciò suggerisce un'origine magnetica per il confinamento dei raggi cosmici. Altro fattore importante è che il rapporto  $N_s/N_p$  visto precedentemente è un valor medio dominato dal flusso a bassa energia e

diminuisce in funzione dell'energia; ciò suggerisce che l'accelerazione è separata dalla propagazione e che la probabilità di fuga è dipendente dall'energia, in accordo con l'idea che il confinamento ha un'origine magnetica, tale da aspettarsi una dipendenza dalla rigidità magnetica. La rigidità magnetica è una grandezza pari al prodotto  $B/r$  tra l'induzione magnetica di un campo in cui si muove una particella carica ed il raggio di curvatura della componente circolare della sua traiettoria. Alle energie più elevate i raggi cosmici dovrebbero quindi essere sempre meno isotropizzati dalla propagazione: questo andamento sembra essere confermato (anche se con ampi errori) dai dati sperimentali, suggerendo che il ginocchio sia correlato alla probabilità di fuga.

Il modello fenomenologico più semplice in grado di conformarsi a ciò è il cosiddetto modello “*Leaky Box*”, il quale assume che le particelle diffondono liberamente in un volume di confinamento, da cui possono fuggire con una probabilità indipendente dal tempo, ma (possibilmente) dipendente dall'energia. Il rapporto tra nuclei secondari e primari assume quindi la forma:

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{\lambda_{esc}/\lambda_p P_{sp}}{1 + \lambda_{esc}/\lambda_s}$$

dipendente dall'energia attraverso  $\lambda_{esc}$ .

Riguardo i meccanismi di accelerazione, ad oggi la descrizione di maggiore successo per la maggior parte dei raggi cosmici (fino a circa  $10^{14}$  eV) è correlata alle onde d'urto delle SuperNovae. Una tale accelerazione proviene dal trasferimento di energia di un corpo macroscopico in movimento (l'onda d'urto dell'esplosione di SuperNova) alle particelle elementari o i nuclei presenti nel mezzo interstellare, dopo molti piccoli passi in cui avviene una variazione di energia. In questa fase le particelle subiscono diffusioni elastiche dalle strutture magnetiche del fronte in espansione in cui scambiano momento ma non perdono energia. Questo modello è però incompleto, in quanto assume l'esistenza di particelle relativistiche prima dell'accelerazione e soprattutto vi sono difficoltà nell'ottenere particelle con

energie maggiori o uguali alla regione del ginocchio dello spettro primario, pur restando un modello generalmente valido.

Per le energie più elevate si ipotizza possano entrare in gioco altri meccanismi di accelerazione, quali generazione di onde d'urto all'interno di campi magnetici, caduta di materia in oggetti compatti (come sorgenti binarie di raggi X) ed esplosioni di SuperNovae all'interno del vento di oggetti progenitori, ma nessuno di questi è sufficiente a spiegare le energie superiori a  $10^{18}$  eV, per le quali ci si rivolge invece a modelli extra-galattici, quali AGNs, radiogalassie e decadimento di oggetti pesanti di origine cosmologica (per una descrizione dettagliata delle ipotesi effettuate si rimanda a Nagano & Watson, 2000 [52] e la bibliografia all'interno).

Un'altra fonte di studio riguarda i cambiamenti nelle direzioni di arrivo degli EECRs, che possono aiutare a determinare la struttura del campo magnetico galattico. Ricordiamo che le particelle cariche in un campo magnetico seguono una traiettoria elicoidale secondo l'equazione di Larmor, che definisce il raggio di Larmor

$$r = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B}$$

dove  $v_{\perp}$  è la velocità della particella perpendicolare al campo magnetico,  $m$  è la sua massa,  $B$  è l'intensità del campo magnetico e  $q$  è la carica dello ione (per l'elettrone  $q = 1$ ). I raggi di Larmor delle particelle con  $\sim 5 \cdot 10^{19}$  eV sono molto più grandi rispetto allo spessore del disco galattico in cui il campo magnetico galattico contribuisce in modo dominante alle traiettorie di propagazione delle particelle. Nel caso di composizione dominata da protoni, il campo magnetico galattico non diffonde lontano l'ammasso di eventi EECR attorno alle sorgenti ma deforma solamente la forma di parecchi gradi a seconda della struttura del campo stesso lungo la linea di vista (Kachelriess *et al.*, 2006 [38]). D'altro canto, per una composizione dominata da nuclei pesanti, le traiettorie di questi, come per i nuclei di ferro, vengono fortemente deflesse, dipendentemente dalla struttura e dalla forza del campo magnetico galattico (Giacinti *et al.* [32]).

### 1.1.3 Il cut-off GZK

Una questione interessante riguarda la massima energia osservabile dei raggi cosmici primari che giungono nell'atmosfera terrestre.

Fin dai primi anni '60, prima della scoperta della radiazione cosmica di fondo di 2.7 K, si sospettava che lo spettro dei raggi cosmici si potesse estendere ad energie dell'ordine di  $10^{21}$  eV.

È però noto che, nelle regioni di energia più elevata, diventano importanti non solo le deflessioni dovute al campo magnetico intergalattico, ma anche le perdite di energia dei raggi cosmici nei campi di radiazione di fondo di microonde, infrarosso e radio.

L'interazione di particelle con i fotoni della radiazione di fondo dell'Universo, attraverso il processo di produzione fotopionica, con una soglia di  $\sim 5 \cdot 10^{19}$  eV, può produrre una soppressione dello spettro energetico dei raggi cosmici di energia estrema, noto come il cut-off Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) (trattato in modo approfondito in Greisen *et al.*, 1966 [34]).

Se le componenti di energia estremamente alta sono di origine extra-galattica, devono viaggiare almeno per  $\sim 100$  Mpc. Solo i protoni sopravviverebbero (i nuclei più pesanti si frammenterebbero) e solo per un'energia massima di circa  $10^{20}$  eV.

Le reazioni principali dei protoni  $p$  con i fotoni del fondo ( $\gamma_{2.7K}$ ) sono:

$$p + \gamma_{2.7K} \rightarrow \begin{cases} n + \pi^+ \\ p + \pi^0 \\ p + e^+ + e^- \end{cases} .$$

I fotoni del fondo dominanti sono nelle microonde, con un'energia del picco di  $6 \times 10^{-4}$  eV ed una densità fotonica di circa  $400/cm^3$ . Sebbene l'energia di soglia per la produzione di coppie (ultima delle reazioni viste prima) è circa  $10^{18}$  eV ed il libero cammino medio è  $\sim 1$  Mpc, comparati con i  $10^{19.6}$  eV e  $\sim 6$  Mpc per la produzione di pioni (la prima reazione), la perdita di energia, per interazione, per

la produzione di coppie è solo lo 0.1% comparato al 20% della produzione di pioni. In tal modo il processo è meno importante rispetto alla produzione di fotopioni.

Calcoli dettagliati sulla forma dello spettro di raggi cosmici risultante dalla propagazione di particelle attraverso questi campi di radiazione di fondo sono stati effettuati con le simulazioni Monte Carlo o usando metodi analitici. Si è così predetto il cut-off dello spettro attorno ad alcuni  $10^{19}$  eV ipotizzando che lo spettro energetico dei raggi cosmici primari si estenda oltre  $10^{20}$  eV e che le sorgenti siano distribuite uniformemente nell'universo.

Nel caso di nuclei pesanti di massa  $A$ , i processi di fotodisintegrazione (Puget *et al.*, 1976 [56]) e di produzione di coppie (Blumenthal, 1970 [21]) diventano importanti:

$$A + \gamma_{2.7K} \rightarrow \begin{cases} (A - 1) + N \\ (A - 2) + 2N \\ A + e^+ + e^- \end{cases},$$

dove  $N$  è un nucleone (protone o neutrone). I canali principali sono  $(\gamma, n)$  e  $(\gamma, p)$ . Il tasso di perdita di energia attraverso l'emissione di doppio nucleone, quale  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, np)$  o  $(\gamma, 2p)$  è circa un ordine di grandezza inferiore rispetto a quello di emissione di singolo nucleone. La perdita di energia dovuta ai fotoni del fondo cosmico nell'infrarosso è efficace solo al di sotto di  $5 \times 10^{19}$  eV, mentre la perdita di energia nelle interazioni con i fotoni del fondo a microonde è più significativa per energie al di sopra di  $2 \times 10^{20}$  eV (Epele & Roulet, 1998 [26]; Stecker & Salamon, 1999 [62]). Nel caso dei raggi gamma, la creazione di coppie tramite l'interazione con la radiazione cosmica di fondo è la più importante (Wdowczyk *et al.*, 1972 [69]) in un ampio intervallo energetico oltre la soglia di  $4 \times 10^{14}$  eV,

$$\gamma + \gamma_{2.7K} \rightarrow e^+ + e^-.$$

Dato che la lunghezza di attenuazione di protoni e nuclei sotto l'energia del cut-off GZK eccede i 1000 Mpc (valore proveniente dagli studi citati precedentemente), la distribuzione attesa per le direzioni di arrivo di tali raggi cosmici è isotropica, se hanno un'origine extragalattica. Se invece le loro energie superano

quella del cut-off GZK, la distanza dalla sorgente è limitata a diverse decine di Mpc e ci si aspettano delle correlazioni tra le direzioni di arrivo e la struttura galattica e/o la scala più grande degli ammassi di galassie. Hillas (1998, [36]) ha calcolato che il 50% delle particelle in arrivo con un'energia di  $10^{20}$  eV provengono da meno di 20 Mpc, mentre a  $4 \times 10^{19}$  eV la distanza corrispondente sale a 130 Mpc.

Bisogna infine notare che, nonostante il cut-off GZK sia oggi una teoria accreditata, ne esistono molte altre che ne mettono in dubbio i presupposti e tentano di spiegare la fisica dei raggi cosmici di energia più alta tramite la supersimmetria (Farrar & Biermann, 1998 [28]), entità esotiche o altri metodi.

Inoltre bisogna ricordare che da alcuni dei processi esotici accennati possono provenire neutrini di energia ultra-elevata e raggi gamma. In particolare il decadimento di filamenti cosmici o particelle supermassive possono produrre questi come secondari. Oltre i nuclei più pesanti, anche un protone di energia estrema può perdere la sua energia nelle collisioni con i fotoni del fondo di radiazione cosmica e produrre in tal modo neutrini cosmogenici. Entrambi i processi lasciano la loro firma nei neutrini cosmogenici di fondo, che possono quindi essere usati per gettare luce sulla natura delle particelle primarie che dominano il flusso degli EECRs.

Per scrutare nelle sorgenti più potenti oltre l'orizzonte GZK, come le galassie radio giganti e le blazars, dobbiamo rivelare quindi i neutrini di energia estrema, che viaggiano senza deviazioni o perdite di energia.

Per questa ragione gli ultimi rivelatori sono stati costruiti in modo tale da rivelare anche raggi gamma e neutrini.

## 1.2 Sciame estesi in aria

Quando un raggio cosmico primario raggiunge la Terra, incontra l'atmosfera terrestre e interagisce con essa. In media, all'interno di una lunghezza di "interazione"  $\lambda_I$ <sup>1</sup>, il nucleo inizia a rompersi in frammenti e questa frammentazione continua finché il nucleo si separa in nucleoni. Questo fenomeno può essere descritto da dettagliati modelli nucleari, ma per i nostri scopi, in particolare ad energie elevate, è possibile affidarsi al modello semplificato della Sovrapposizione: un nucleo con numero di massa  $A$  ed energia totale  $E_0$ , si comporta come un insieme di  $A$  nucleoni indipendenti, ognuno dei quali aventi energia  $E_0/A$  e lunghezza d'interazione  $\lambda_I$ . Ogni nucleone interagisce con i nuclei bersaglio dell'atmosfera producendo parecchi adroni nello stato finale; ogni particella adronica interagisce poi nuovamente con l'atmosfera o decade in altre particelle. Ad energie molto elevate la lunghezza tipica di interazione di un nucleone in aria è circa  $80 \text{ g/cm}^2$ , mentre un nucleo pesante può interagire dopo soli pochi  $\text{g/cm}^2$ . Si ottiene così l'evoluzione di uno sciame adronico di particelle, che si sviluppa completamente in quanto l'atmosfera è profonda  $\simeq 13 \lambda_I$ , per i protoni. Ad ogni passo nel processo di formazione dello sciame, il numero di particelle aumenta mentre l'energia media diminuisce; perciò il numero di particelle raggiunge il massimo ad una determinata profondità che è funzione dell'energia, della natura della particella primaria (infatti la prima interazione di un nucleo di ferro avviene in media molto prima rispetto ad un protone) e dei dettagli delle interazioni di primari e secondari nella cascata. Dopo ciò, l'energia per particella è così degradata (al di sotto di una determinata "energia critica"<sup>2</sup>) che le perdite di energia dominano sul processo di moltiplicazione delle particelle e la "dimensione" dello sciame diminuisce in funzione della profondità.

La maggior parte delle particelle prodotte in ogni interazione adronica sono

---

<sup>1</sup>La lunghezza di interazione è il libero cammino medio di una particella prima di subire un'interazione in un dato mezzo.

<sup>2</sup>L'energia critica dipende dal processo: per esempio, per elettroni di bassa energia, è quella per cui le perdite energetiche per ionizzazione diventano importanti, mentre per muoni sotto terra è l'energia necessaria per produrre un muone in grado di penetrare la roccia attraverso il rivelatore.

mesoni  $\pi$  e  $K$ . Tali pioni e kaoni carichi possono decadere in muoni e neutrini prima di interagire, producendo così la componente più penetrante degli sciami atmosferici. I pioni neutri decadono immediatamente in fotoni che danno il via a sciami elettromagnetici (la  $\lambda_I$  nell'atmosfera è circa  $37 \text{ g/cm}^2$  e l'energia elettromagnetica critica è di  $81 \text{ MeV}$ ), composti da elettroni, positroni e fotoni.

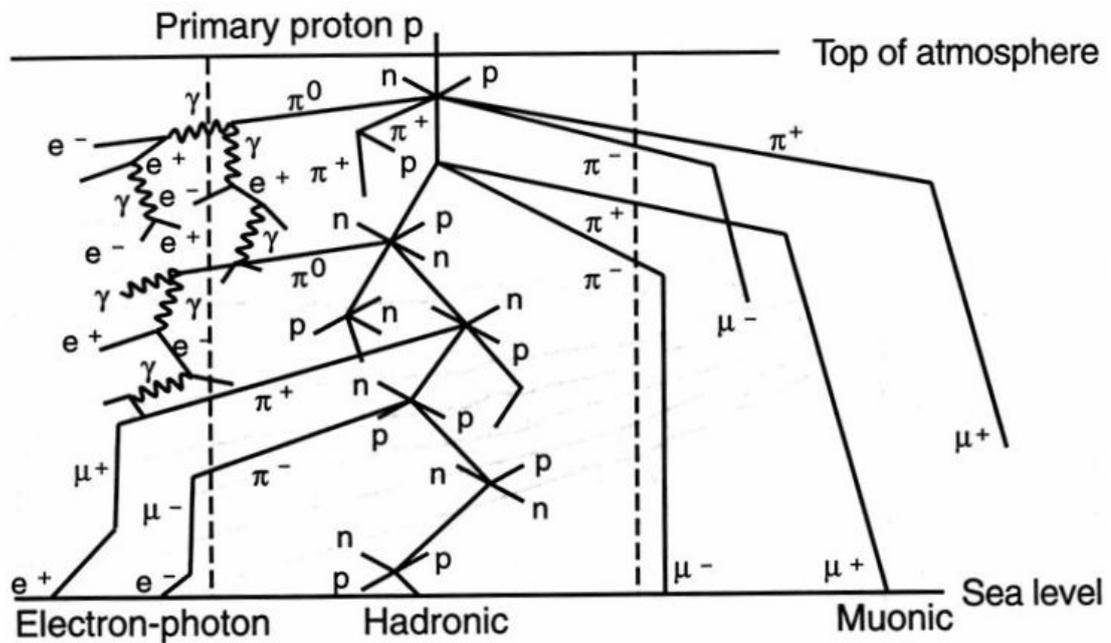


Figura 1.3: Riproduzione artistica delle componenti di uno sciame esteso in aria.

Questi sciami atmosferici sono noti come Sciami Estesi in Aria (Extensive Air Showers, abbreviati in EASs), una cui rappresentazione è mostrata in Figura 1.3. Il loro sviluppo longitudinale è funzione della natura e dell'energia della particella primaria, mentre l'estensione laterale dipende dal momento trasversale medio della componente adronica e, nel caso di componente elettromagnetica (che, come numero di particelle, è la più importante), è fortemente affetta dalla diffusione multipla di Coulomb.

Storicamente, si è avuta evidenza dei raggi cosmici di energia più elevata proprio grazie alle osservazioni degli EASs, misurati per la prima volta in alcuni degli esperimenti con l'uso di camere a nebbia. Il fisico Pierre Auger ed i suoi colleghi

cominciarono studi sistematici con rivelatori distanziati dagli anni '30; notarono così coincidenze in due o più rivelatori separati da distanze fino a 300 m, capendo subito la correlazione tra essi, che venivano colpiti da particelle provenienti da un singolo raggio cosmico di energia elevata entrato in atmosfera e le cui particelle secondarie non avevano perso tutta l'energia arrivando a terra.

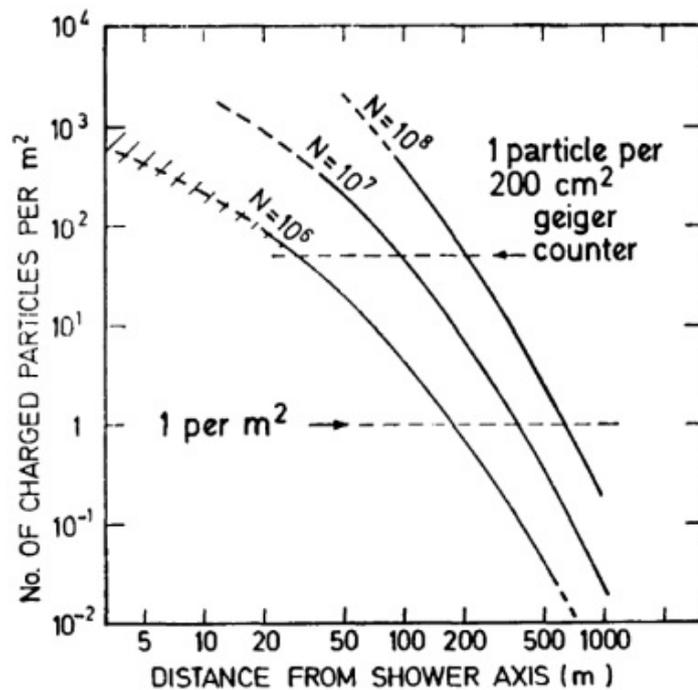


Figura 1.4: La distribuzione di particelle cariche in funzione della distanza dall'asse dello sciame per sciame di differenti taglie (numero di particelle per unità di superficie). Da Hillas, 1972 [35].

Dopo molti anni di osservazioni e teorie, oggi si può dire che la distribuzione di particelle cariche in funzione della distanza dal punto di impatto al suolo dell'asse dello sciame è simile per sciame di taglie differenti. La distribuzione di particelle è illustrata in Figura 1.4. Si è scoperto che la distribuzione in funzione della distanza dal punto di impatto al suolo dell'asse dello sciame non è molto differente dal tipo di distribuzione che ci si aspetterebbe da uno sciame elettrone-fotone; la distribuzione varia solo molto vicino all'asse. A volte i punti di impatto sono multipli e ciò suggerisce che i rispettivi sciame sono stati generati da nuclei

piuttosto che da protoni, ma non c'è accordo generale su questo argomento.

Si può avere una buona idea di cosa accade da uno dei primi studi, effettuato tramite un esperimento combinato americano-giapponese (per i dettagli si veda Hillas, 1972 [35]), portato avanti in Bolivia ad un'altitudine di 5200 m sul Monte Chacaltaya che si trova a circa metà strada nell'atmosfera ( $520 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). Furono costruiti rivelatori su un'ampia area per tutti i tipi di particelle e calcolato il numero di particelle che risultavano dagli sciame in funzione dell'angolo di zenith  $\theta$  (Figura 1.5). Poichè la lunghezza del tragitto dello sciame attraverso l'atmosfera varia come  $520 \sec \theta \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , l'angolo  $\theta$  era calcolato misurando il tempo di ritardo tra le attivazioni dei rivelatori nei vari punti della matrice di rivelatori. Questi studi mostrano che lo spessore dello sciame non è più di qualche metro (Figura 1.5); lo spessore della componente elettronica è meno di 2 m, quello della componente muonica 3-4 m e gli adroni, che sono più massivi, li seguono a qualche metro di distanza: le particelle quindi arrivano in "pancakes".

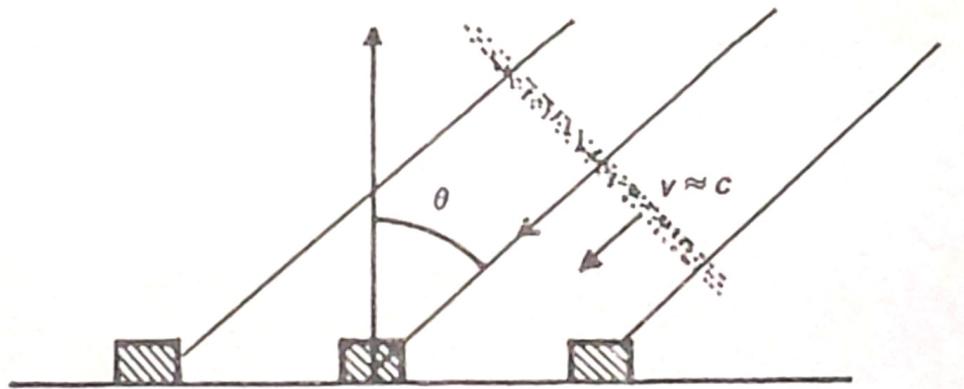


Figura 1.5: Un diagramma che illustra l'arrivo di uno sciame esteso in aria all'angolo di zenith  $\theta$ .

Il modo in cui è possibile ottenere un'immagine dello sviluppo degli sciame è quello di assumere che tutti gli sciame nati da particelle della stessa energia si sviluppano nello stesso modo. Quindi si assume che il tasso di arrivo dei raggi cosmici di diverse energie non vari col tempo. Se a questo punto si riporta la distribuzione della dimensione dello sciame a differenti profondità  $D$  attraverso

l'atmosfera (ovvero a differenti angoli di zenith  $\theta$ ) si ottengono distribuzioni della forma mostrata nella Figura 1.6.

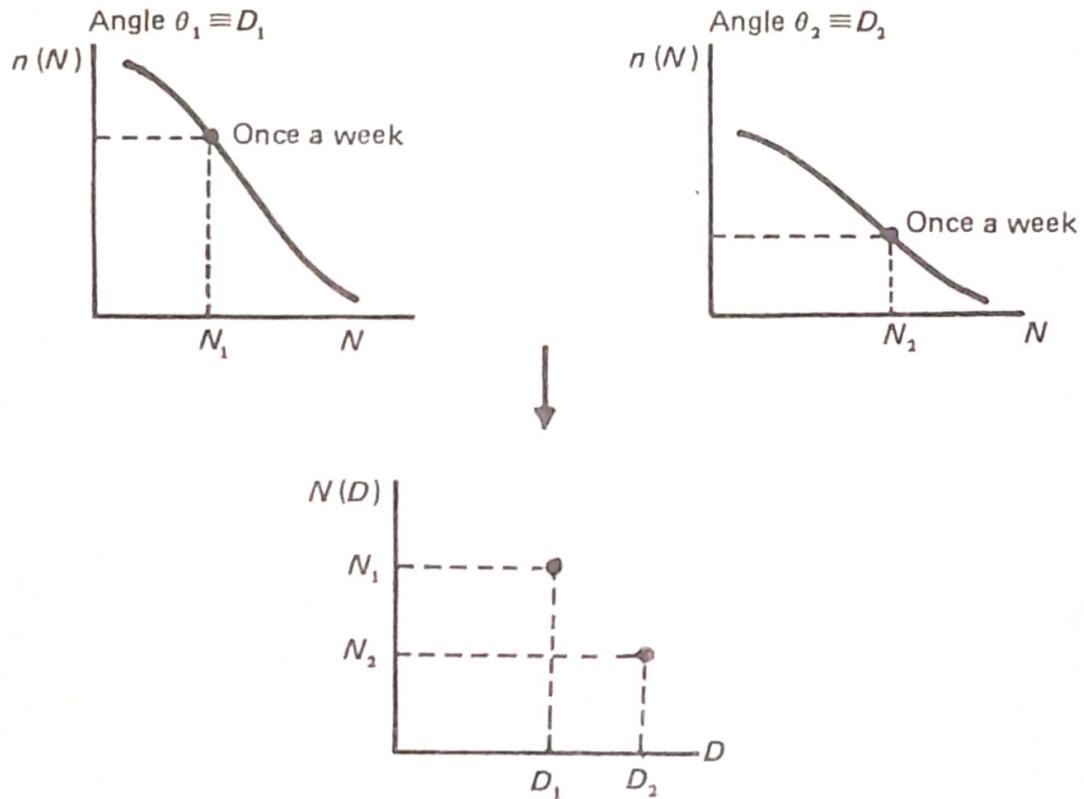


Figura 1.6: La determinazione dello sviluppo nell'atmosfera di sciami estesi in aria di taglie differenti, da osservazioni a diversi angoli di zenith  $\theta$ ;  $n(N)$  è il tasso di avvenimento degli sciami di  $N$  particelle. Un'angolo di zenith  $\theta_1$  è pari ad una profondità nell'atmosfera di  $D_1 = 520 \sec \theta_1 \cdot g \cdot \text{cm}^{-2}$ .

Se si effettuano osservazioni per un lungo periodo di tempo, si possono equiparare le frequenze di avvenimento degli eventi e ciò mostra come si comporta in media lo sviluppo dello sciame in funzione della profondità nell'atmosfera e tale procedura porta alla raffigurazione media dello sviluppo degli sciami di differenti energie. La Figura 1.7 mostra i risultati di questa tecnica. Nel diagramma vengono mostrati due insiemi di particelle di diverse energie. Gli sciami sembrano raggiungere i rispettivi massimi a circa  $520 g \cdot \text{cm}^{-2}$  nell'atmosfera, mentre bisogna notare che l'estrapolazione a profondità più piccole è fatta usando modelli teorici

per il loro sviluppo in aria<sup>3</sup>.

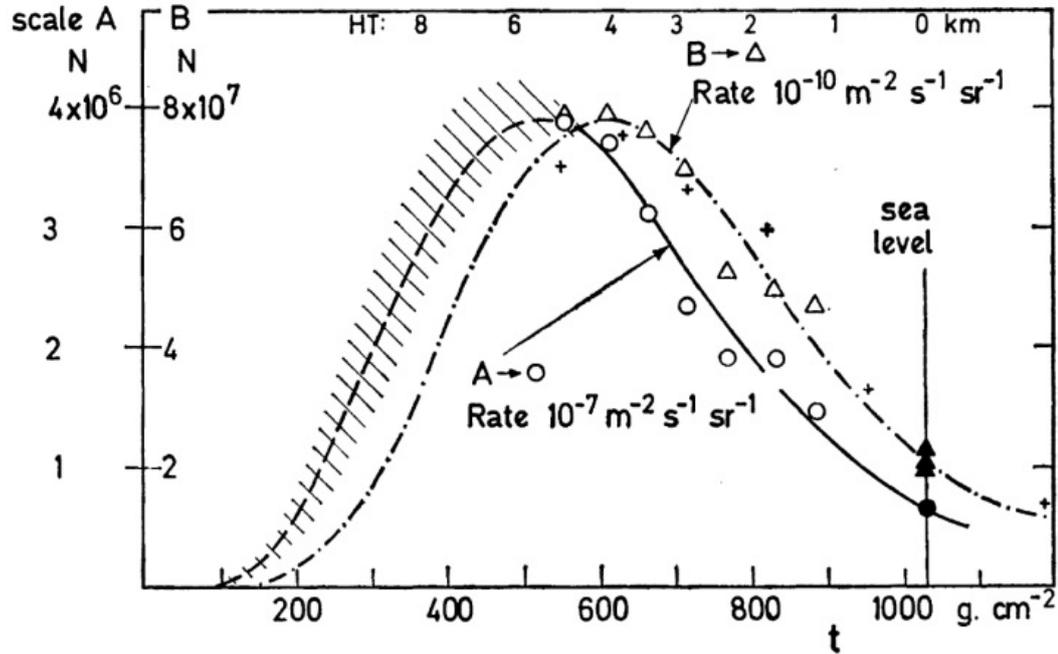


Figura 1.7: Il numero di particelle  $N$  negli sciami rivelati a fissati tassi  $A$  o  $B$  in funzione della profondità nell'atmosfera a Chacaltaya ed ai laboratori al livello del mare.  $N(D)$  mostra approssimativamente la crescita ed il decadimento degli sciami di un'energia particolare. L'estrapolazione delle curve a lunghezze inferiori a  $520 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$  è basata sulla teoria. Da Hillas, 1972 [35].

Dato che la maggior parte delle interazioni nucleari finiscono con la produzione di cascate elettromagnetiche, la maggioranza dell'energia va a finire nella forma di elettroni relativistici (la Figura 1.7 mostra il numero di elettroni, ognuno dei quali perde  $2.2 \text{ MeV}$  per  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , il tasso di perdita di energia medio per gli elettroni nella regione relativistica); quindi è possibile stimare la perdita di energia totale degli elettroni dall'area totale sotto la curva.

Dallo studio degli sciami raffigurati si nota che:

- la maggior parte dell'energia in arrivo al livello del terreno è in forma di muoni, anche se al massimo sviluppo sono gli elettroni ad avere la maggior parte dell'energia;

<sup>3</sup>In ogni caso lo sviluppo non può dipendere in modo sostanziale da ciò che accade oltre  $520 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$  in quanto si deve essere sicuri che si possano creare  $10^6$  particelle o più.

- esiste una buona proporzionalità tra l'energia totale dello sciame ed il numero di particelle al massimo sviluppo;
- più la particella è energetica, più in basso avviene il massimo dello sciame in atmosfera.

Questi sciame sono stati simulati con grande dettaglio lavorando su tutte le possibili interazioni ed integrando su tutte le distribuzioni di probabilità appropriate per ottenerne tutte le caratteristiche: dimensione, estensione laterale, composizione in funzione dell'estensione laterale, ecc.

Per rivelare le particelle più energetiche sono però richieste delle matrici di rivelatori molto grandi, sia perchè esse producono gli sciame più estesi, sia perchè sono così rare da richiedere una vasta area di rivelatori per avere qualche possibilità di rivelarne una. Alcune delle matrici di rivelatori più grandi sono descritti nel ¶ 2.1.

### 1.3 Tecniche sperimentali di rivelazione dei raggi cosmici

È possibile dividere i metodi sperimentali adottati per misurare i flussi e le composizioni chimiche dei raggi cosmici primari in due ampie categorie: misure “dirette” e “indirette”. Le misure dirette sono quelle che rivelano e identificano direttamente le particelle primarie; per questo devono essere effettuate ad altitudini elevate (palloni stratosferici e satelliti) dato che l’atmosfera si comporta da assorbitore. Date le difficoltà di tali condizioni sperimentali, queste misure danno risultati soddisfacenti fino a circa  $10^{12}$  *eV/nucleone*, per cui anche una piccola “apertura” è sufficiente per ottenere misure significative in un periodo di tempo limitato (un pallone può volare al massimo per 10-15 giorni). Il limite massimo in energia per tali misure è di  $10^{14}$  *eV*.

Ad energie più elevate (dalla regione del ginocchio in poi) il flusso è così basso che l’unica possibilità è quella di avere rivelatori terrestri che coprano ampie aree ed operino per lunghi periodi. In questo caso l’atmosfera viene considerata come bersaglio e si studiano le proprietà dei primari in modo “indiretto”, tramite la misura delle particelle secondarie prodotte nell’atmosfera; questo rende tali osservazioni fortemente dipendenti dalla conoscenza dello sviluppo e della propagazione degli EASs, descritta nel ¶ 1.2.

Per questi motivi, la classificazione degli esperimenti di raggi cosmici in osservazioni da pallone/spazio e da terra è praticamente equivalente a quella riferita alle misure dirette e indirette. Nel seguito verranno quindi descritti i diversi tipi di tecniche in modalità di misura indiretta (mostrati in Figura 1.8).

#### 1.3.1 Rivelatori di Superficie

Con i Rivelatori di Superficie (che usano solitamente matrici di rivelatori di scintillazione disposti su una vasta area), è possibile campionare la quantità di particelle elettromagnetiche (definita solitamente come “dimensione dello sciamme”) in arrivo sulla superficie terrestre ad una data profondità nell’atmosfera,

### Measuring cosmic-ray and gamma-ray air showers

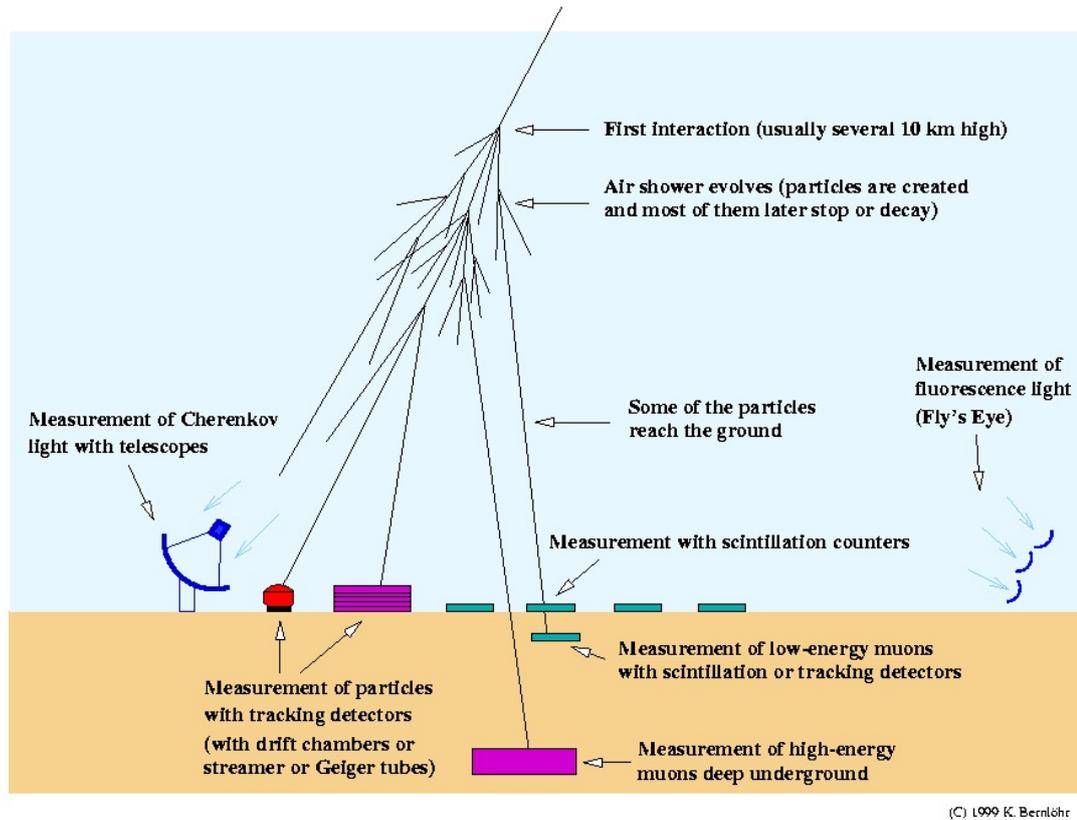


Figura 1.8: Rappresentazione dei metodi tramite cui vengono rivelate le varie componenti che formano uno sciame esteso in aria.

definita dall'altezza della matrice sul livello del mare e dall'angolo di inclinazione dell'asse dello sciame al suolo. Per una data direzione, e quindi per un dato spessore dell'atmosfera, è possibile determinare l'energia del primario,  $E_0$ , e possibilmente la composizione in massa,  $A$ , tramite strumenti di simulazione dedicati alla descrizione delle interazioni adroniche e dell'evoluzione dello sciame. Una determinazione più completa della composizione in massa può essere realizzata misurando la correlazione tra componenti diverse (ad esempio il numero di  $e^+e^-$  ed il numero di muoni e/o adroni) ad una data profondità atmosferica. È facile capire tutto ciò all'interno del modello di Sovrapposizione: le cascate indotte da nuclei più pesanti si sviluppano e si attenuano più velocemente rispetto agli sciami

di pari energia indotti da protoni, in quanto hanno un'energia per nucleone inferiore; i nucleoni di energia minore producono mesoni di energia ancora inferiore, e questi decadono più spesso di quelli ad alta energia, che producono un numero maggiore di muoni. D'altro canto, la rapida attenuazione delle cascate che nascono da pioni di bassa energia producono meno elettroni (positroni) nella parte più bassa dell'atmosfera. Muoni e adroni possono essere identificati da rivelatori di tracce. Queste matrici di rivelatori di superficie campionano solo una parte dello sciamone ma possono ricoprire un'area estremamente grande, fino a parecchi  $km^2$  (alcuni esempi di tali matrici sono descritti nel ¶ 2.1).

Gli studi sulla composizione in massa dei raggi cosmici primari con gli esperimenti da terra seguono due approcci principali: l'analisi della componente singola e quella multi-componente.

Il primo metodo permette la stima dei parametri di composizione o la comparazione di dati misurati con le predizioni di modelli di prova tramite la misura di un singolo parametro dell'EAS. Tale metodo ha ovvi vantaggi nella possibilità di ottenere modelli con statistica elevata ed un facile controllo della risposta del rivelatore ma ha lo svantaggio di un limitato potere di discriminazione; inoltre la deconvoluzione dello spettro primario dai dati sperimentali è generalmente difficoltosa e dipendente dal meccanismo di interazione nucleare.

Nel caso di analisi multi-componente, vengono misurati simultaneamente due o più parametri dell'EAS. Il potere di discriminazione dell'analisi è decisamente migliore rispetto al primo approccio e quindi la composizione misurata è generalmente meno dipendente dalla propagazione dell'EAS in aria. D'altro canto, gli svantaggi derivano dai forti tagli sui modelli di dati imposti dalle richieste di coincidenza (come i tagli sulla geometria e/o l'accettanza per i rivelatori di particelle cariche o il periodo di funzionamento per i rivelatori di luce). È inoltre importante notare che questo approccio richiede un controllo generalmente non banale dei rivelatori e degli effetti tra i rivelatori.

### 1.3.2 Rivelatori di Fluorescenza

Per quanto riguarda il termine “fluorescenza”, esso si riferisce al processo in cui gli atomi assorbono fotoni di una lunghezza d’onda ed emettono fotoni ad una lunghezza d’onda più lunga. La componente ionizzante degli EASs può indurre tale radiazione fluorescente dall’eccitazione di molecole d’azoto  $N_2$  dell’aria. Una parte di questa energia di eccitazione viene poi emessa nella forma di radiazione visibile e UV.

Rigorosamente parlando, questo è un processo di “luminescenza”, ma il nome “Fluorescenza in Aria” è stato adottato dalla comunità astroparticellare per descrivere la luce di scintillazione degli EASs. In tal modo è possibile distinguere tra un rivelatore di fluorescenza ed uno di scintillazione (usato solitamente per la rivelazione da sali inorganici o plastica organica).

I fotoni prodotti in aria per il fenomeno della fluorescenza sono in numero inferiore rispetto alla radiazione Cherenkov e l’efficienza è bassa, ma hanno il vantaggio di essere emessi isotropicamente ed avere un coefficiente di assorbimento relativamente basso in atmosfera. Questo permette la costruzione di telescopi di fotomoltiplicatori omni-direzionali che coprono un’area efficace piuttosto grande e consentono di misurare il profilo longitudinale dello sciame, identificando anche la profondità atmosferica del massimo dello sciame. La comprensione delle sistematiche associate alla rivelazione sperimentale della luce di fluorescenza non è una questione banale.

Nella costruzione di rivelatori di fluorescenza per sciami estesi in aria, la luce di scintillazione viene raccolta usando una lente o uno specchio ed acquisita da una camera posizionata nel piano focale. La camera suddivide l’immagine in pixels e registra il tempo di arrivo della luce insieme alla quantità di luce raccolta da ogni pixel. Questa tecnica può essere usata lavorando durante notti senza nuvole ed in assenza di luna, usando camere molto veloci per registrare lampi di luce della durata di alcuni  $\mu s$ .

La tecnica di fluorescenza in aria fu studiata nei primi anni '60 ai Laboratori scientifici di Los Alamos ed usata inizialmente come metodo per rivelare la resa delle esplosioni nucleari nei test atmosferici. Molte particelle cariche sono espulse da un'esplosione nucleare e tali particelle producono luce di scintillazione nel passaggio attraverso l'aria. L'ammontare della luce raccolta può quindi essere usata per stimare la quantità totale di energia rilasciata dal dispositivo.

I primi tentativi di osservare EASs tramite le emissioni di fluorescenza furono effettuati da un gruppo dell'Università di Cornell a metà degli anni '60. Essi costruirono un rivelatore composto da 500 tubi fotomoltiplicatori, ognuno dei quali corrispondente ad un pixel che copriva un angolo solido di 0.01 sr (per un totale di  $\sim 6^\circ \times 6^\circ$ ). I 500 fotomoltiplicatori erano divisi in 10 moduli, ognuno dei quali equipaggiato con una lente di Fresnel da  $0.1 \text{ m}^2$  ed un filtro ottico per ridurre la luminosità di fondo notturna ed eliminare la contaminazione di luci visibili all'orizzonte. Nonostante gli ottimi presupposti, tale esperimento ebbe poco successo sia per le dimensioni ridotte delle lenti che per l'atmosfera contaminata di New York.

Solo alla fine degli anni '70 si iniziò a costruire rivelatori di fluorescenza in grado di rivelare la luce dagli sciami provenienti dai raggi cosmici, aprendo così la strada alla costruzione di rivelatori dalle prestazioni migliori.

Invece di campionare lo sciame a terra attraverso una griglia di molti rivelatori, il rivelatore di fluorescenza segue la traiettoria dell'EAS e misura l'energia dissipata dalle particelle dello sciame nell'atmosfera che si comporta come un calorimetro composto da più di  $10^{10}$  tonnellate d'aria e il cielo intero viene visto da un vasto numero di occhi segmentati usando i fotomoltiplicatori.

Un tubo fotomoltiplicatore (Photo-Multiplier Tube, abbreviato in PMT) è un rivelatore elettronico di luce estremamente sensibile nell'ultravioletto, nel visibile e nel vicino infrarosso. Il dispositivo è talmente sensibile da poter rivelare un singolo fotone.

Il funzionamento del PMT si basa principalmente su due effetti: l'effetto

fotoelettrico e l'emissione secondaria (cioè l'elettromoltiplicazione).

Il PMT classico è costituito da un tubo in vetro al cui interno è stato praticato il vuoto, in cui è presente un anodo e diversi elettrodi che costituiscono i dinodi.

I fotoni colpiscono attraverso una finestra di ingresso una superficie chiamata fotocatodo, ricoperta di uno strato di materiale che permette l'effetto fotoelettrico. A causa di questo effetto vengono emessi degli elettroni, chiamati fotoelettroni, che sono focalizzati da un elettrodo verso lo stadio di moltiplicazione.

Lo stadio di moltiplicazione è costituito da una serie di elettrodi ciascuno caricato ad un potenziale superiore rispetto al precedente. Il primo elettrone emesso per effetto fotoelettrico subisce una accelerazione a causa del campo elettrico e acquisisce energia cinetica; quando l'elettrone colpisce il primo elettrodo del dinodo provoca l'emissione secondaria di diversi elettroni di minore energia. La struttura del sistema è progettata in modo che ciascun elettrone emesso da un elettrodo venga accelerato e provochi l'emissione di diversi elettroni dall'elettrodo successivo. Si ha così un fenomeno a cascata per cui un singolo fotone che colpisce il tubo provoca il passaggio di moltissimi elettroni. Il guadagno  $G$ , cioè il numero totale di elettroni prodotti per fotone incidente in un PMT a  $n$  dinodi è:  $G = f^n$ , dove  $f$  è il fattore di emissione di elettroni secondari di ogni dinodo. Al termine della sequenza di elettrodi gli elettroni colpiscono un anodo ed un rapido impulso elettrico indica il rivelamento del fotone.

L'amplificazione del dispositivo può arrivare a  $10^8$ . L'alto guadagno, il basso rumore intrinseco, l'estrema prontezza, l'elevata risposta in frequenza e l'ampia superficie sensibile fanno sì che questo dispositivo sia largamente usato in fisica delle particelle ed in fisica astroparticellare nei telescopi di fluorescenza.

## Capitolo 2

# Il progetto JEM-EUSO

L'“Osservatorio Spaziale dell'Universo Estremo (Extreme Universe Space Observatory, abbreviato in EUSO)” è la prima Missione Spaziale votata all'osservazione dell'Universo tramite la rivelazione di raggi cosmici dalla Stazione Spaziale Internazionale (International Space Station, abbreviata in ISS). Installato sul Modulo Sperimentale Giapponese (Japanese Experiment Module, abbreviato in JEM) della ISS, JEM-EUSO utilizzerà l'atmosfera terrestre come un calorimetro gigante per lo studio di raggi cosmici di energia più elevata, le particelle più energetiche provenienti dall'Universo. Guardando la Terra dallo Spazio, JEM-EUSO rivelerà tali particelle osservando il segnale di fluorescenza prodotto durante il loro passaggio nell'atmosfera. L'obiettivo principale di JEM-EUSO consiste nella possibilità di fare astronomia ed astrofisica attraverso il canale di particelle di energie estreme ( $E > 5 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ ) ed estendendo quindi, con statistica significativa, la misura dello spettro energetico della radiazione cosmica oltre il limite del cut-off GZK. Inoltre JEM-EUSO potrà osservare neutrini di energia estrema, aprendo così il campo dell'astronomia dei neutrini di alta energia. Infine, JEM-EUSO contribuirà all'investigazione dei fenomeni intrinseci dell'atmosfera terrestre. JEM-EUSO è stato progettato per operare per più di 3 anni a bordo della ISS orbitante attorno alla Terra ogni 90 minuti ad un'altezza di circa 400 km. JEM-EUSO deriva dallo sforzo collaborativo internazionale di 75 gruppi di ricerca da 15 Paesi.

## 2.1 Osservatori di raggi cosmici di energia estrema

Il primo degli osservatori giganti per la rivelazione di sciami estesi in aria di raggi cosmici di energia elevata fu costruito a Volcano Ranch, New Mexico, da Linsley, Scarsi e Rossi nel 1961. I rivelatori erano 19 contatori di scintillazione plastici di  $3.3 \text{ m}^2$ , corredati da PMTs di  $5''$  e coprivano un'area di  $8.1 \text{ km}^2$ . I dati di Volcano Ranch produssero le prime misure dello spettro di energia dei raggi cosmici oltre i  $10^{18} \text{ eV}$ , dando il primo indizio di un appiattimento dello spettro in quella regione (Linsley, 1963b [43]), indizio che impiegò oltre 20 anni per trovare conferma. Linsley (1963a [42]) effettuò anche la prima misura sulla distribuzione della direzione di arrivo di questi eventi eccezionali. L'evento più energetico rivelato aveva un'energia di  $1.4 \times 10^{20} \text{ eV}$  (Linsley, 1980 [44]) e rimase uno dei più ampi mai registrati, riportato prima della scoperta della radiazione cosmica di fondo da 2.7 K e della seguente predizione di un cut-off dello spettro.

Tra il 1967 e il 1987 fu operativa un'ampia matrice di rivelatori Cherenkov ad acqua (che, a differenza degli scintillatori plastici, rispondono ai fotoni in un modo molto efficiente) ad Haverah Park, UK, che copriva un'estensione di  $12 \text{ km}^2$ . L'impossibilità geografica di posizionare i rivelatori su una griglia uniforme, portò alla soluzione di avere una matrice centrale di quattro rivelatori a distanza di  $500 \text{ m}$  con sei sotto-matrici distanziate di 50 e 150 metri tra loro, ad una distanza dal centro di circa 2 km. Gli elementi rivelatori erano costituiti da vasche d'acqua ( $2.25 \text{ m}^2 \times 1.2 \text{ m}$ ), corredate da PMTs da  $5''$  montati nel centro della superficie sommitale delle vasche.

La prima matrice gigante operativa nell'Emisfero Sud fu costruita dall'Università di Sidney a Narrabri, New South Wales, Australia, al livello del mare (McCusker & Winn, 1963 [47]; Bell *et al.*, 1974 [12]). Il Sydney University Giant Air-Shower Recorder (SUGAR) conteneva 54 stazioni disposte su  $60 \text{ km}^2$ ; ogni stazione era autonoma, con le proprie alimentazione ed elettronica. Per ridurre il tasso di segnale di fondo, ogni stazione consisteva di un paio di scintillatori

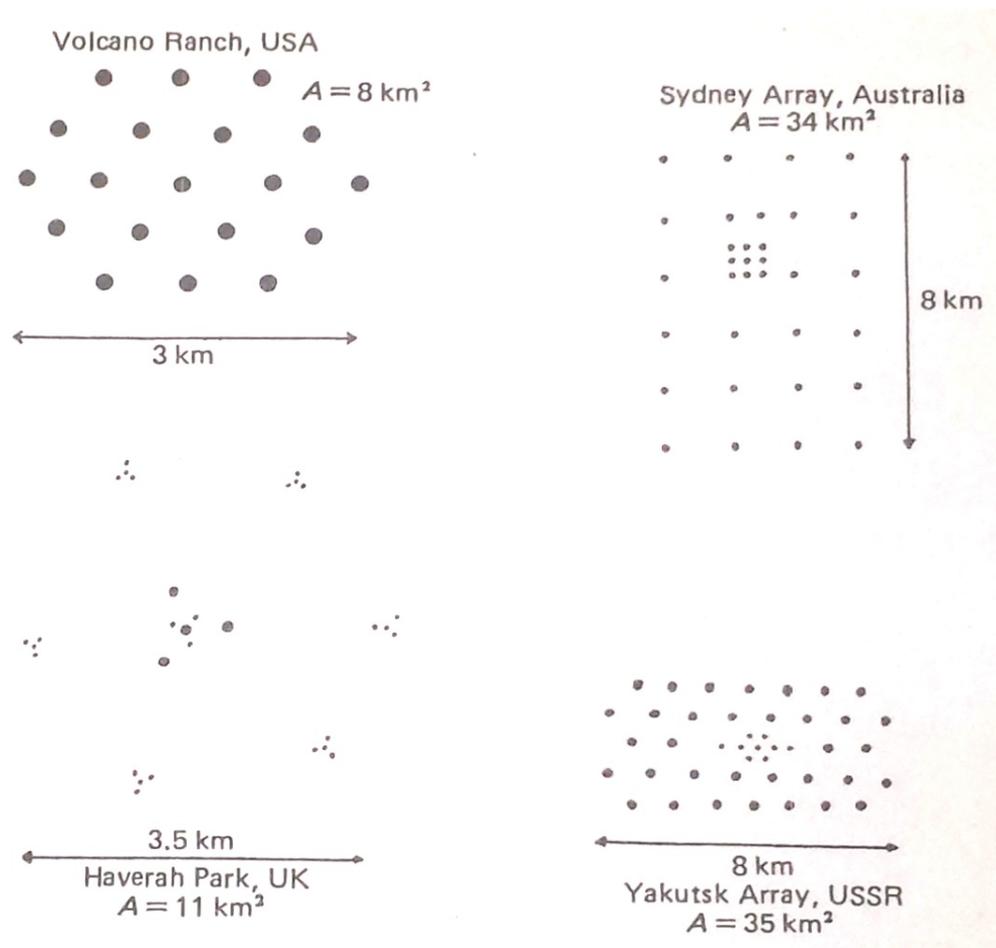


Figura 2.1: Un diagramma schematico che mostra la disposizione dei rivelatori di raggi cosmici in alcune delle matrici più grandi.  $A$  è l'area efficace. La posizione del centro dello sciame viene determinata da metodi statistici tramite i flussi di particelle rivelati in ogni stazione.

di  $6 \text{ m}^2$  sepolti 1.7 m sotto terra, così da rispondere preferibilmente a muoni di energia elevata. La spaziatura tra i rivelatori si dimostrò troppo grande, ottenendo così risultati di bassa densità, tuttavia SUGAR fu un ottimo precursore dell'Osservatorio Pierre Auger, descritto in seguito.

Una delle matrici giganti più complesse è stata quella adoperata dall'Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy a Yakutsk, Siberia, che cominciò ad acquisire dati nel 1970 e fu sviluppato per coprire un'area di  $18 \text{ km}^2$  nel 1974. Una descrizione completa dell'apparato è stata data da Afanasiev *et al.*, 1993 [2]; composto da tre matrici nidificate, con quella più interna costituita da 19 rivela-

tori a scintillazione, circondati da altri 43 simili su una griglia che copriva  $10 \text{ km}^2$  ed ulteriori 17 rivelatori distanziati tra loro di 1 km, oltre a vari rivelatori di muoni intervallati con gli scintillatori. Una caratteristica particolarmente importante di tale installazione era la presenza di 35 sistemi PMT di diverse aree al fine di misurare la radiazione Cherenkov in aria associata con gli sciami ed ottenere così informazioni indirette sullo sviluppo longitudinale degli sciami, oltre a provvedere ad un approccio calorimetrico alla calibrazione dell'energia per le particelle primarie.

Un diagramma schematico della disposizione delle matrici negli esperimenti citati viene mostrato in Figura 2.1.

Altro famoso esperimento è stato quello denominato Fly's Eye dell'Università dello Utah, i cui rivelatori furono collocati nel deserto ad overst dello Utah, USA, a Dugway Proving Grounds, circa 160 km a sud ovest di Salt Lake City, operativo dal 1981 al 1992. Era costituito da due rivelatori, Fly's Eye I (FE I) e Fly's Eye II (FE II), separati da una distanza di 3.4 km e composti rispettivamente da 67 specchi di diametro 1.6 m con 880 PMTs a coprire il cielo intero e 36 specchi con 464 PMTs che osservavano metà cielo in direzione di FE I (per i dettagli di rivelatori, operatività e prestazioni si rimanda a Baltrusaitis, Cady *et al.*, 1985 [6]). Fu possibile effettuare un'analisi incrociata con accuratezza maggiore nel tracciare lo sviluppo degli sciami nell'atmosfera, osservando l'intensità e la sequenza temporale della luce di fluorescenza, grazie alla quale è stato possibile misurare la massima profondità dello sciame ( $X_{max}$ ) direttamente ed ottenere così risultati importanti riguardo la composizione primaria. Da ricordare inoltre che questo esperimento ha rivelato l'evento di raggi cosmici di energia estrema più energetico nella storia delle osservazioni (circa  $3 \times 10^{20} \text{ eV}$ ), grazie soprattutto al potenziamento della strumentazione, denominata in seguito HiRes (High Resolution Fly's Eye).

Una delle più grandi matrici costruite, con un'area coperta di  $100 \text{ km}^2$ , è stata quella costruita ad Akeno, Giappone: l'Akeno Giant Air-Shower Array (AGASA) che consisteva di 111 rivelatori a scintillazione, ognuno di area  $2.2 \text{ m}^2$ , intervallati

tra loro di 1 km e da 27 rivelatori di muoni. L'intera area era divisa in quattro rami e l'acquisizione di dati iniziò nel 1990, fino alla loro unificazione nel 1995. Grazie alle unità di controllo indipendenti di ogni sito (in grado di registrare tempo e densità di ogni segnale incidente) fu possibile fare grossi passi avanti nella ricostruzione degli sciami.

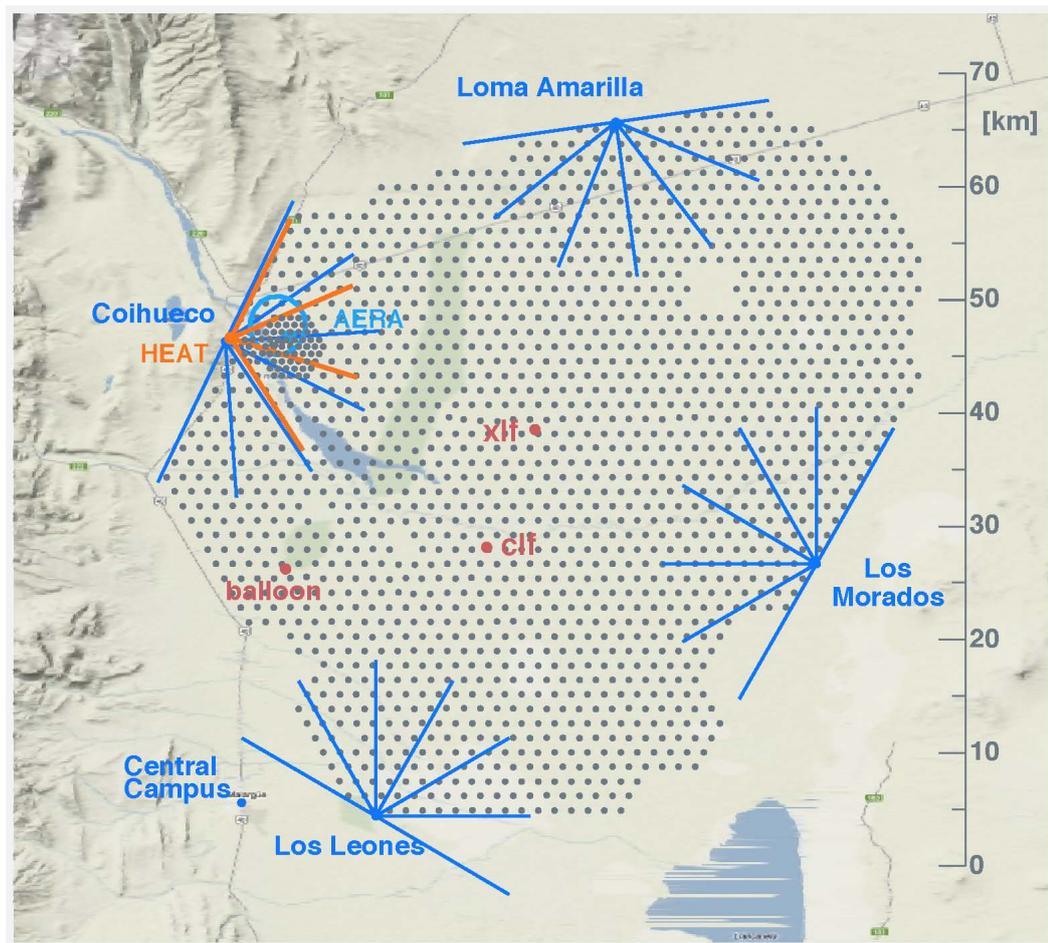


Figura 2.2: Raffigurazione grafica del diagramma schematico che mostra la disposizione dei rivelatori di superficie e di fluorescenza all'interno del sito dell'Osservatorio Pierre Auger.

Per concludere, non può mancare il più importante sito di rivelazione mai costruito: l'Osservatorio Pierre Auger. Grazie alla sua area di rivelazione di  $3000 \text{ km}^2$  (mostrata in Figura 2.2) nella provincia di Mendoza, nella Pampa argentina, è l'esperimento più grande e ambizioso mai costruito nella storia della

rivelazione dei raggi cosmici. Con la costruzione iniziata nel 2000, ha cominciato ad acquisire dati dal 2005 per concludere una prima fase di rivelazioni nel 2008. Il Rivelatore di Superficie (Surface Detector, abbreviato in SD) consiste in oltre 1600 rivelatori Cherenkov ad acqua, sistemati secondo una griglia triangolare di 1.5 km di spaziatura, mentre il Rivelatore di Fluorescenza (Fluorescence Detector, abbreviato in FD) è costituito da 24 telescopi di fluorescenza, posizionati ai lati del perimetro del SD. Ognuna delle stazioni Cherenkov è composta da una vasca di area pari a  $10 \text{ m}^2$  contenente acqua purificata per 1.2 m di altezza. La luce Cherenkov prodotta in acqua dalle particelle degli sciami viene acquisita da tre fototubi e i segnali digitalizzati vengono trasmessi ad un sistema di acquisizione centrale. I telescopi di fluorescenza sono disposti in 4 stazioni, ognuna delle quali alloggia 6 telescopi (con angolo di vista  $180^\circ$  in azimuth e  $30^\circ$  in elevazione). Ogni telescopio consiste in uno specchio sferico di  $11 \text{ m}^2$  con un'apertura di diametro 2.2 m che contiene un anello correttore per migliorare la qualità delle immagini, ed un filtro ottico (300-400 nm) appropriato per il segnale di fluorescenza. Le immagini si formano su una camera di 440 PMT. L'Osservatorio Pierre Auger è quindi un osservatorio ibrido (come mostrato in Figura 2.3): l'SD fornisce un'ampia apertura, facilmente calcolabile, con rivelatori robusti, in modo da misurare le direzioni di arrivo con buona risoluzione, mentre l'FD fornisce misure in energia,  $X_{max}$  e direzioni di arrivo, pur soffrendo di un periodo di presa dati inferiore, causato dalla necessità di operare solo in notti senza nuvole e senza luna. In conclusione i due metodi effettuano misure degli stessi parametri degli EASs ma con sistematiche totalmente differenti, integrandosi così alla perfezione. Ad oggi l'Osservatorio Pierre Auger è ancora in funzione e si prospettano miglioramenti per renderlo un esperimento ancora più competitivo ed efficiente.

Infine bisogna parlare del progetto Telescope Array (TA), che nasce come una collaborazione tra università ed istituti di Stati Uniti, Giappone, Corea, Russia e Belgio. L'esperimento è rivolto all'osservazione di sciami indotti da raggi cosmici di energia estrema, tramite una combinazione di rivelatori a terra e tecnica



Figura 2.3: Fotografia che riprende un rivelatore Cherenkov ad acqua nella Pampa e alle spalle la collinetta con l'edificio contenente i telescopi di fluorescenza dell'Osservatorio ibrido Pierre Auger.

di fluorescenza in aria. L'insieme di rivelatori di scintillazione a terra campiona l'impronta dello sciame quando raggiunge la superficie, mentre i telescopi di fluorescenza misurano la luce di scintillazione generata nel passaggio dello sciame attraverso l'atmosfera. TA osserva raggi cosmici con energie superiori a  $10^{18}$  eV. I rivelatori di superficie campionano eventi in circa 300 miglia quadrate nel deserto e consistono in circa 500 rivelatori di scintillazione (ognuno dei quali di  $3\text{ m}^2$ , posizionato su una griglia quadrata di lato  $1.2\text{ km}$ ); inoltre vi sono tre stazioni di telescopi in un triangolo di  $30\text{ km}$ , ognuna delle quali equipaggiata con 12-14 telescopi. TA acquisisce dati in pieno deserto del Millart County, Utah, USA sin dal 2007.

## 2.2 Il telescopio JEM-EUSO

Il sensore è un super-telescopio ad ampio campo che rivela particelle di energia superiore a  $5 \cdot 10^{19}$  eV. Questo strumento orbiterà attorno alla Terra ogni 90 minuti circa a bordo della ISS ad un'altezza di 300-400 km. JEM-EUSO cattura il percorso dei fotoni UV fluorescenti e riproduce lo sviluppo calorimetrico dell'EAS (il principio osservativo viene rappresentato in Figura 2.4).

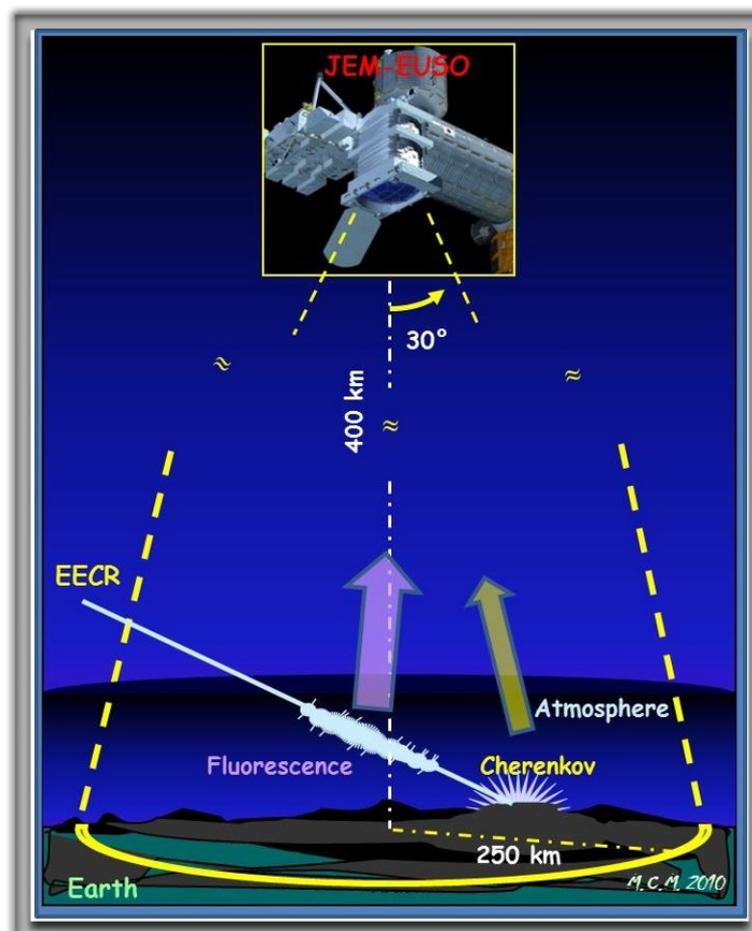


Figura 2.4: Principio osservativo del telescopio JEM-EUSO.

Il telescopio JEM-EUSO ha un campo di vista molto ampio ( $\pm 30^\circ$ ) con ottiche composte da lenti di Fresnel, in grado di registrare la traccia di un EAS con una risoluzione temporale di  $2.5 \mu s$  ed una risoluzione spaziale di circa 0.5 km (corrispondenti a  $0.075^\circ$ ) in modalità nadir. Queste immagini a tempi di-

versi permettono di determinare l'energia e la direzione delle particelle primarie. La superficie focale del telescopio JEM-EUSO è formata da circa  $5 \cdot 10^3$  PMTs multianodo (abbreviati in MAPMTs); il numero di pixels è dell'ordine di  $3 \cdot 10^5$ .

Inizialmente proposto come satellite a sè stante, il primo osservatorio EUSO fu poi selezionato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) come missione da agganciare al modulo europeo Columbus della ISS. La fase-A di studio della fattibilità di tale osservatorio fu completata con successo nel Luglio del 2004 sotto l'ESA (EUSO Collaboration, 2004 [27]). A causa però di problemi finanziari dell'ESA e dei paesi europei, la data di inizio della fase-B fu postposta per lungo tempo. Nel 2006, i gruppi giapponese ed americano ridefinirono EUSO come una missione da agganciare al modulo JEM/EF (JEM/Exposure Facility) della ISS. Il progetto fu così denominato JEM-EUSO ed ebbe inizio una nuova fase A di studio, i cui primi risultati furono riportati nel Dicembre del 2008. Questa fase A continuò con simulazioni estensive, progettazione e sviluppi hardware del prototipo che hanno significativamente migliorato il profilo della missione JEM-EUSO, portando all'ipotesi di un lancio nel 2016 durante la seconda fase di utilizzo della ISS.

Il lavoro effettuato in questa fase, fino all'anno 2010, è stato poi riassunto in un report, noto anche come Purple Book [37] e nel lavoro di Santangelo *et al.* [59] che riassumono scopi e caratteristiche della missione.

Rispetto al primo progetto, JEM-EUSO riduce la soglia di energia fino a  $\sim 3 \cdot 10^{19}$  eV ed aumenta l'area efficace grazie a miglioramenti nella tecnologia e traendo vantaggio dalle caratteristiche specifiche del modulo JEM/EF. La riduzione della soglia energetica è stata realizzata grazie a nuovi materiali per le lenti ed a miglioramenti alle ottiche, rivelatori con un'efficienza quantica più elevata e un algoritmo di trigger migliorato. L'aumento dell'area efficace è stato realizzato inclinando il telescopio (rispetto alla modalità nadir) nella cosiddetta "modalità tilt". In questo modo la soglia energetica aumenta dato che aumentano sia la distanza media dall'EAS che l'assorbimento atmosferico. I primi anni del tempo di vita della missione saranno votati ad osservare la regione a bassa energia

in “modalità nadir” mentre i seguenti ad osservare la regione ad alta energia in “modalità tilt”.

Il telescopio JEM-EUSO può ricostruire la direzione incidente degli EECRs con un’accuratezza migliore di alcuni gradi. L’area che osserva a terra è un cerchio di 250 km di raggio, mentre il volume atmosferico sotto esso, con un campo di vista di  $60^\circ$ , è poco più di  $10^{12}$  ton. L’obiettivo di volume per gli eventi di neutrini dall’alto oltrepassa le  $10^{13}$  ton. L’apertura istantanea di JEM-EUSO è più ampia di quella dell’Osservatorio Pierre Auger di un fattore tra 65 e 280, dipendente dal modo di osservazione (nadir o tilted).

Nonostante queste migliorie e le prospettive di una fisica così interessante, il progetto JEM-EUSO, pianificato per essere agganciato al modulo JEM della ISS e lanciato nel 2016 con un vettore, è andato incontro alla crisi economica mondiale, che ha ulteriormente postposto queste date. In particolare la parte giapponese della collaborazione ha ritirato la propria candidatura per il vettore di trasporto, creando incertezza sul futuro dell’intera missione. L’Agenzia Spaziale Russa (ROSCOSMOS) ha dato la sua disponibilità nel subentrare in tale ruolo, ma - oltre al possibile cambio di nome del progetto in KLYPVE-EUSO (KLYPVE è il corrispettivo russo di UHECR) - i cambiamenti da apportare al telescopio, richiesti dalla nuova gestione, sarebbero di grossa entità, portando così ad una situazione in cui non vi sono ancora certezze su come evolverà il futuro dell’intero progetto. Attualmente è in corso una fase di R&D (Ricerca&Sviluppo) del progetto JEM-EUSO, che consiste nella realizzazione di tre prototipi: Euso-Balloon, EUSO-TA e Mini-EUSO, che verranno trattati nel ¶ 2.3.

### 2.2.1 Caratteristiche Tecniche

La strumentazione JEM-EUSO consta di un telescopio di fluorescenza per la rivelazione di sciame di raggi cosmici di energia estrema, di strumentazione per il monitoraggio atmosferico e di un sistema di calibrazione.

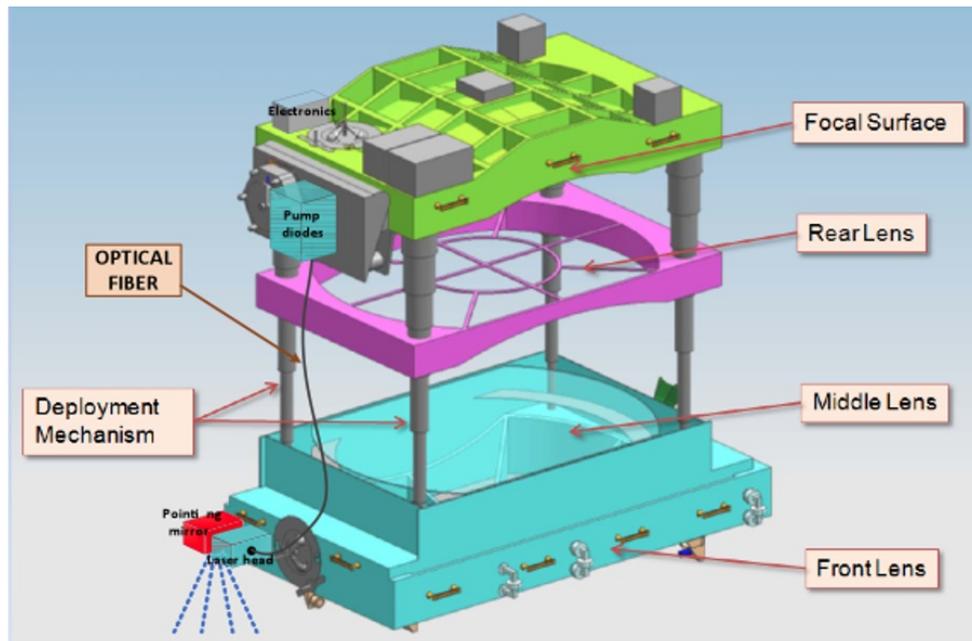


Figura 2.5: Vista schematica del telescopio JEM-EUSO.

Il telescopio JEM-EUSO è una camera digitale veloce, suddivisa in un numero elevato di pixels (che consentono di osservare il cielo suddiviso in tanti segmenti contigui secondo la tecnica cosiddetta ad “occhio di mosca”), di ampia apertura e con un grande campo di vista, che lavora nell’intervallo di lunghezze d’onda del vicino UV ( $330 \div 400 \text{ nm}$ ) con alta capacità di conteggio di singolo fotoelettrone. Le componenti principali del telescopio sono l’ottica di raccolta, il rivelatore con la sua superficie focale, l’elettronica e la struttura meccanica, come mostrato nella Figura 2.5.

Le seguenti Tabelle 2.1 e 2.2 riassumono i parametri chiave della missione e del telescopio, aggiornati al 2011.

Il sistema ottico di base del telescopio UV è composto da due lenti di Fresnel

Tempo per il lancio	2016
Periodo operativo	3 anni (+2 anni)
Vettore di lancio	H2B
Trasporto sulla ISS	HTV
Sito di aggancio	JEM/EF
Massa	1983 kg
Potenza	926 W (operativo) - 352 W (non operativo)
Velocità di trasferimento dati	285 kbps
Altezza orbitale	~ 400 km
Inclinazione orbitale	51.64°

Tabella 2.1: Tabella riassuntiva dei parametri della missione JEM-EUSO.

Campo di Vista	$\pm 30^\circ$
Area di osservazione	$> 1.3 \times 10^5 \text{ km}^2$
Larghezza di banda	330 – 400 nm
Area della Superficie Focale	4.5 m <sup>2</sup>
Numero di pixels	315648
Grandezza di un pixel	~ 3 mm
Grandezza di un pixel a terra	~ 560 m
Risoluzione angolare	0.075°
GTU	2.5 $\mu$ s
Duty cycle	~ 20%

Tabella 2.2: Tabella riassuntiva dei parametri del telescopio JEM-EUSO.

curve a doppia faccia con diametro esterno di 2.65 m, una lente di Fresnel curva intermedia ed una pupilla. Le lenti di Fresnel forniscono un'ampia apertura, un vasto campo di vista, una piccola massa ed una trasmittanza luminosa nell'estremo UV. La combinazione di tre lenti genera un campo di vista ad angolo intero di 60° ed una risoluzione angolare in modalità Nadir di 0.075°, che corrispondono approssimativamente a 0.5 - 0.6 km sulla superficie terrestre. I materiali presi in considerazione per le lenti sono il PMMA (PolyMethyl-Methacrylate)-000 (prodotto dalla Mitsubishi Rayon) e il CYTOP (prodotto dalla Asahi Glass Inc.): entrambi hanno un'elevata trasparenza UV nelle lunghezze d'onda tra 330 e 400 nm. La lente di Fresnel intermedia è una lente di precisione che adotta una tecnologia ottica diffrattiva ed è usata per sopprimere l'aberrazione di colore. I dettagli delle ottiche sono descritti in Takizawa *et al.*, 2009 [66] ed in Maekawa *et*

*al.*, 2009 [46].

La superficie focale (Focal Surface, abbreviata in FS) del rivelatore è una sfera con raggio di curvatura di circa 2.7 m, composta da una griglia di 4932 MAPMTs Hamamatsu M64 (R11265-M64) da 64 pixels (8x8), che convertono l'energia dei fotoni incidenti in impulsi elettrici con durata di 10 ns. Il fototubo è equipaggiato con un fotocatodo ultra-bialkali ed una finestra di trasmissione nell'UV spessa 0.8 mm; questo assicura un'efficienza quantica maggiore del 35% (con un massimo del 40%) nel range 330-400 nm. La superficie focale è organizzata in 137 moduli di rivelazione (Photo-Detector Modules, abbreviati in PDMs), ognuno dei quali consiste di nove celle elementari (elementary cells, abbreviate in ECs), contenenti quattro MAPMT-M64 ciascuna. I dettagli della superficie focale del rivelatore sono descritti in Kawasaki *et al.*, 2009 [40] e Miyamoto *et al.*, 2009 [50] e sono inoltre mostrati nella schematizzazione in Figura 2.6.

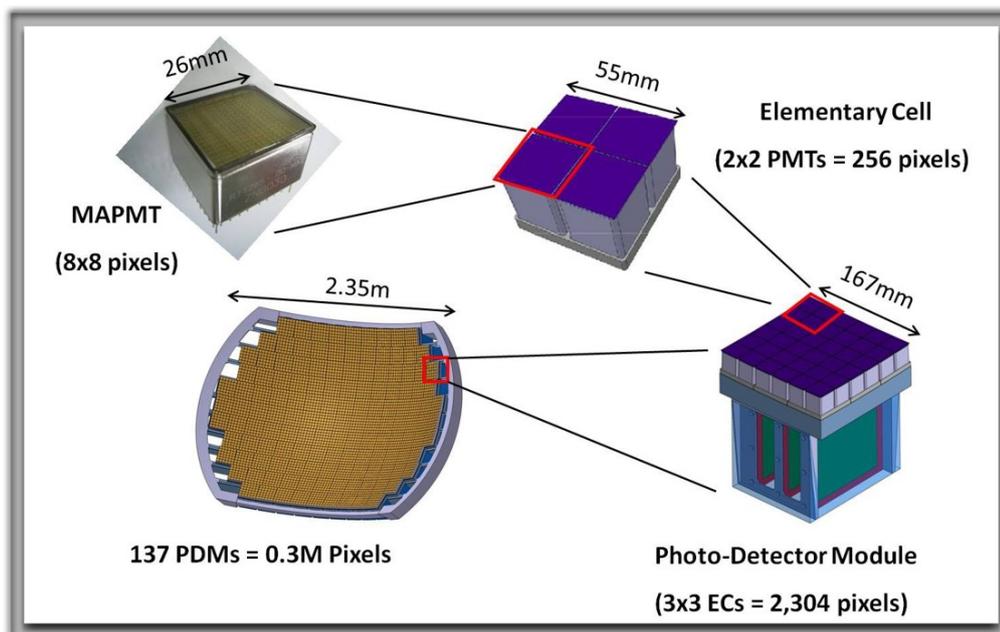


Figura 2.6: Vista schematica della Superficie Focale del rivelatore JEM-EUSO.

Il sistema elettronico della superficie focale registra nel tempo i segnali dei fotoni UV generati dalla cascata elettromagnetica dello sciame in aria. Si richiede

che il sistema abbia un'elevata efficienza di trigger con un algoritmo di trigger flessibile e lineare nell'intervallo tra  $10^{19}$  e  $10^{21}$  eV. Inoltre è necessario che il consumo di potenza per canale sia inferiore a 2.5 mW al fine di gestire  $3 \times 10^5$  canali all'interno del budget di potenza data di 1 kW. L'elettronica della superficie focale è configurata in quattro livelli: l'elettronica di Front-end al livello delle celle elementari; l'elettronica della PDM per gestire nove unità di celle elementari; l'elettronica di Cluster Control Board per gestire insiemi di 8 PDMs e l'elettronica della superficie focale per controllare tutte le 137 PDMs. L'elettronica di acquisizione dati è una classica ASIC altamente integrata con i sensori e fornisce la pre-amplificazione, la formazione del segnale e la possibilità di conteggio di fotoni. Per far fronte ad eventi luminosi (raggi cosmici di energia elevata, riflessione Cherenkov, sorgenti luminose di fondo) l'elettronica di acquisizione dati deve anche provvedere all'integrazione di carica. La tecnica del conteggio di singolo fotoelettrone viene usata per misurare il numero di fotoni raccolti per unità di tempo (Gate Time Unit, abbreviata in GTU, pari a  $2.5 \mu s$ ) e per ogni pixel (si veda Catalano *et al.*, 2008 [24] per i dettagli). I segnali all'anodo dei MAPMTs vengono contati e registrati in memorie ad anello per ogni GTU e quando viene emesso un trigger primario (attivato dall'elettronica quando viene trovato un modello di segnale proveniente da eventi di particelle di energia estrema), i dati vengono letti ed inviati per controllo ed ulteriore trigger, tenendo traccia delle informazioni conservate in memoria. JEM-EUSO usa uno schema gerarchico per fornire un trigger veloce in grado di gestire parecchie centinaia di migliaia di canali. Lo schema del trigger deve essere selettivo per riconoscere i segnali degli EASs e rigettare il fondo in modo efficiente. Deve infatti ridurre la quantità dei dati da 10 GB/s sull'intera superficie focale fino a 297 kbps per adattarsi ai vincoli della telemetria della ISS. Le unità PDM possono funzionare in quattro modi di trigger: a) modo normale con una GTU di  $2.5 \mu s$  per osservazioni di routine di EASs; b) modo lento con una GTU programmabile fino a qualche ms, per lo studio di meteoriti ed altri fenomeni luminosi atmosferici; c) modo di calibrazione dei

rivelatori con un valore della GTU adatto ai cicli di calibrazione e d) modo Lidar (vedi sotto) con una GTU di 200 ns. I dettagli sull'intera elettronica possono essere trovati in Kajino *et al.*, 2009 [39], Bertaina *et al.*, 2009 [17] e Casolino *et al.*, 2009 [22].

Per quanto riguarda il monitoraggio atmosferico, JEM-EUSO userà una camera a infrarossi (IR) ed un Lidar (Light Detection and Ranging) con laser ultravioletto per osservare le condizioni dell'atmosfera nel campo di vista del telescopio, con l'obiettivo di determinare il tempo effettivo di osservazione e di incrementare l'attendibilità degli eventi attorno alla soglia d'energia. Nello specifico, l'ultima versione di JEM-EUSO ha ridotto il ruolo del Lidar ad osservare la condizione delle nuvole in vari punti del campo di vista di JEM-EUSO e calibrare con accuratezza elevata i coefficienti di trasformazione tra l'altezza delle sommità delle nuvole e la loro temperatura, ottenuta dall'analisi delle immagini della camera IR. Essendo la lunghezza d'onda del laser (355 nm) nell'intervallo di interesse di JEM-EUSO, la superficie focale del rivelatore del telescopio sarà usata come unità ricevitrice del Lidar.

JEM-EUSO sarà calibrato tramite strumentazione sia a bordo che a terra. Il sistema di calibrazione a bordo è composto da un insieme di tre LEDs con diverse lunghezze d'onda (da 300 a 500 nm) che saranno installati nel cilindro del telescopio come sorgenti di luce diffusa. Misurando, tramite la superficie focale del rivelatore, la luce di tali sorgenti, che passa attraverso l'ottica e viene riflessa dalla superficie laterale interna, si potrà calibrare il guadagno e l'efficienza di rivelazione del rivelatore. Saranno, inoltre, installate delle lampade allo Xenon, sorgenti di impulsi di luce, in una dozzina di siti a terra in modo tale che, passando JEM-EUSO sopra di esse, circa una volta al giorno, rivelerà tali luci e misurerà l'assorbimento UV atmosferico totale e calibrerà il dispositivo. Al fine di stimare l'errore sistematico nell'energia e nella direzione d'arrivo dei raggi cosmici primari, il telescopio JEM-EUSO osserverà il laser ultravioletto delle stazioni Lidar a terra come EASs simulati. Questa osservazione permetterà inoltre di stimare la trasmit-

tanza dell'atmosfera in funzione dell'altezza. Oltre alla calibrazione dei dispositivi prima del lancio, tutte le citate calibrazioni saranno usate complementariamente per ottenere possibili influenze causate dalla variazione a lungo termine nella sensibilità dello strumento e dall'ambiente atmosferico variabile.

### 2.2.2 Trigger di primo livello

Per soddisfare il limite richiesto di dati da trasferire a Terra per le successive analisi (297 kbps, come spiegato nel § 2.2.1), il sistema di trigger per la rivelazione di raggi cosmici è organizzato in due livelli successivi. Il primo livello opera a livello della cella elementare (Elementary Cell, abbreviata in EC), unità base dell'elettronica di front-end. Il suo obiettivo principale è di ridurre il numero di falsi triggers fino a  $\sim 1 \text{ Hz}/EC$ . La componente dominante di tali falsi trigger è dovuta alle fluttuazioni del segnale di fondo, che causano coincidenze accidentali. Le luci di origine umana, come le città, si trovano in media solo per  $\sim 10\%$  dell'orbita (Adams *et al.*, 2013 [1]). Il secondo livello di trigger è progettato per funzionare a livello della PDM e ci si aspetta che riduca ulteriormente il numero di triggers fino a  $\sim 0.1 \text{ Hz}/FS$ . Nonostante questo basso numero di falsi eventi, gli EASs contribuiscono per meno del  $\sim 1\%$  del totale, dipendentemente dall'intensità del fondo luminoso. Il principio per distinguere un evento di EAS da qualsiasi altro fenomeno, risiede sull'idea base che esso viaggia alla velocità della luce lungo una linea. Questo implica che il tempo massimo in cui il segnale può transitare su una PDM (EC) è dell'ordine di  $\sim 70$  (40) GTUs. Si ottiene tale risultato assumendo che l'EAS sia visibile, in un'ipotesi non realistica ma estremamente conservativa, dall'altitudine del punto di prima interazione assunto a 30 km da terra e viaggi attraverso la diagonale del campo di vista della PDM, la quale è un quadrato di  $\sim 30 \times 30 \text{ km}^2$ . Nel caso di una cella elementare, il campo di vista è ridotto a  $\sim 10 \times 10 \text{ km}^2$  ancora visibile da un'altezza di 30 km.

Il concetto del primo livello di trigger viene descritto nel seguito, mentre per quanto riguarda il secondo livello e le sue attuali implementazioni, si fa riferimento a Bayer *et al.*, 2011 [10] e Bayer *et al.*, 2013 [11], accennando qui solo al fatto che esso riceve dal primo livello un segnale d'allerta, con blocchi di 128 GTUs di dati da processare e l'informazione su quale parte della PDM e a quali GTUs il primo livello si è attivato.

Il primo livello di trigger, noto come Persistency Tracking Trigger (PTT), scarta la maggior parte delle fluttuazioni di fondo luminoso richiedendo che un segnale locale persistente oltre la media del fondo duri solo alcune GTUs. A questo livello di trigger, i pixels sono raggruppati in celle  $3 \times 3$ . Si attiva un trigger se per un certo numero di GTUs consecutive,  $N_{pst}$ , è presente almeno un pixel nella cella elementare con un'attività (numero di conteggi) uguale o superiore alla soglia prefissata,  $n_{thr}^{pix}$ , ed il numero totale di fotoelettroni (photoelectrons, abbreviati in phe) rivelati nella cella sia più alto di un valore prefissato  $n_{thr}^{cell}$ .  $N_{pst}$  viene fissato a 5 GTUs nelle simulazioni attuali, mentre  $n_{thr}^{pix}$  e  $n_{thr}^{cell}$  vengono scelti in funzione dell'intensità di fondo per mantenere il numero di triggers su eventi falsi attorno ad 1 Hz per cella elementare. Per un livello medio di fondo di circa 1 phe/pixel/GTU,  $n_{thr}^{pix}$  viene fissata a 3 e  $n_{thr}^{cell}$  a 39, come mostrato nelle illustrazioni della Figura 2.7. Per una spiegazione più approfondita riguardo la scelta dei suddetti parametri e per una tabella riepilogativa delle soglie scelte per ogni livello medio di luminosità ambientale, si rimanda a Bertaina *et al.*, 2014b [19].

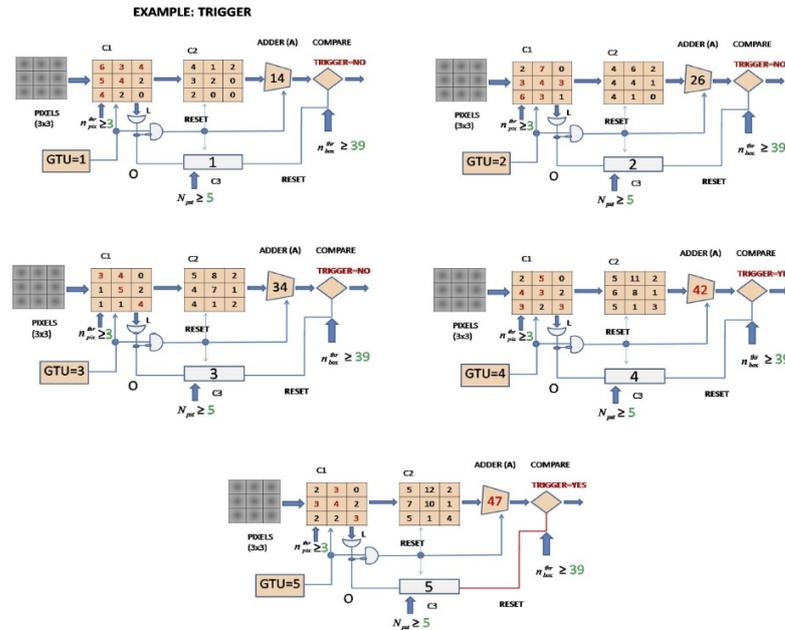


Figura 2.7: Schema del concetto del PTT con una rappresentazione di 5 GTUs consecutive; si veda il testo per i dettagli.

Entrando nel dettaglio, il rivelatore riceve continuamente luce e conta fotoelettroni in ogni pixel per ogni GTU. La cella elementare è suddivisa in celle di  $3 \times 3$  pixels. Ogni pixel centrale di un PMT appartiene a 9 celle differenti sia che si trovi al centro di una cella o che appartenga ai bordi. Le celle non si sovrappongono su due PMTs per conservare memoria. È stato dimostrato tramite simulazioni che tenendo conto di ciò, l'efficienza del trigger aumenterebbe marginalmente.

Focalizzando adesso l'attenzione su una cella ed assumendo di essere alla  $GTU = 1$ , il contatore C1 riceve l'informazione sui conteggi misurati da ogni pixel in quella GTU. Adopera il filtro  $n_{thr}^{pix}$  e conserva i conteggi in eccesso nel contatore C2. In parallelo avviene un controllo sull'intera cella elementare per verificare che almeno un pixel abbia un numero di conteggi almeno uguale o superiore a  $n_{thr}^{pix}$ . Questa condizione è solitamente rispettata ed il contatore di persistenza aumenta ad 1. C1 viene quindi azzerato e riceve i nuovi dati alla  $GTU = 2$ . Il medesimo processo continua per le 4 GTUs successive ed alla fine della quinta viene operato un controllo per verificare che il numero totale di conteggi conservato nel contatore C2 ed accumulato nell'Adder (Addizionatore delle 5 GTUs) ecceda  $n_{thr}^{cell}$ . Se la condizione è soddisfatta, il trigger viene attivato.

A partire dalla sesta GTU i conteggi accumulati nella prima del blocco di 5 vengono cancellati e sostituiti con quelli della nuova GTU. Il processo continua e viene dato un segnale di allerta di trigger per ogni GTU in cui l'ammontare totale di conteggi eccede  $n_{thr}^{cell}$ .

Una caratteristica importante per distinguere un EAS da qualsiasi altro fenomeno fisico luminoso che avviene nell'atmosfera, è la durata. Come accennato precedentemente, un EAS è visibile su una cella elementare per meno di 45 GTUs. Questo tempo è molto più breve delle frazioni di tempo minime in cui una cella elementare viene illuminata da un fulmine (ms, Sato *et al.*, 2005 [60]), dalle meteore (centinaia di ms, Bertaina *et al.*, 2014a [18]) e da città o aerei (almeno dell'ordine dei 50 ms, e più verosimilmente secondi se l'abitato si estende per diversi km).

Iniziando dalla GTU in cui il PTT si attiva, viene attivato anche un conta-

tore di conferma. Nelle  $N_{GTU}$  GTUs consecutive, il contatore di conferma viene incrementato di 1 per ogni GTU in cui il PTT si attiva. Dopo  $N_{GTU}$ , se il contatore di conferma supera una certa soglia  $N_{GTU}^{thr}$ , il trigger non si attiva perchè significa che il PTT si è attivato per una frazione di tempo più lunga della durata attesa di un EAS. Negli esempi descritti nel Capitolo 5,  $N_{GTU} = N_{GTU}^{thr} = 72$ , ma i due numeri possono essere fissati indipendentemente.

Se il valore accumulato nel contatore di conferma non raggiunge  $N_{GTU}^{thr}$ , la conferma del trigger porta all'attivazione del secondo livello di trigger. Questo meccanismo permette una riduzione significativa del numero di triggers dovuti a sorgenti luminose prive di interesse. In tutti i casi in cui rimane un certo numero di triggers non voluti, questi vengono gestiti dal secondo livello.

La stima del livello medio di fondo ambientale sulla cella elementare è un parametro chiave per decidere i parametri del PTT. Ad oggi, ogni cella elementare è suddivisa in gruppi di  $4 \times 2$  pixels, per un totale di 32 sottosezioni per cella elementare. Ogni 128 GTUs viene calcolato il livello di conteggi medio per ogni gruppo di pixels. Il valore più alto viene usato per assegnare le soglie al PTT per le successive 128 GTUs. Assumendo un livello medio di fondo ambientale di 1 phe/pixel/GTU, l'incertezza statistica associata al calcolo del livello di fondo da ogni gruppo di pixels è di  $\sim 3\%$ . Questa tecnica permette di stimare nuove soglie ogni  $320 \mu s$ . In questo lasso di tempo la posizione relativa della ISS a terra cambia di poco più di 2 m. Quindi tutte le sorgenti artificiali come città, aerei e navi possono essere considerate statiche a questo livello. Il campo di vista a terra di 8 pixels è  $\sim 2 - 3 km^2$  dipendentemente dalla linea di vista dei pixels. In questo modo è possibile calcolare velocemente la salita del livello di fondo in aree localizzate, dovuto alla presenza di luci di origine umana. Inoltre il calcolo del fondo ambientale in sotto-aree della cella elementare ha due vantaggi: a) tiene conto della risposta non omogenea tra PMTs e tra pixels dello stesso PMT; b) riduce la probabilità che una sorgente di luce di origine umana diventi una sorgente di trigger.

### 2.2.3 Scopi

JEM-EUSO è progettato per rivolgersi ai problemi fondamentali della fisica di base e dell'astrofisica delle alte energie, investigando la natura e l'origine dei raggi cosmici di energia estrema, che costituiscono la componente più energetica della radiazione cosmica. JEM-EUSO effettuerà misure accurate dell'energia primaria, della direzione di arrivo e della composizione degli EECRs, utilizzando un volume bersaglio molto più grande di quanto sia possibile dalla superficie terrestre. Tali dati getteranno luce sull'origine degli EECRs, sulle sorgenti che li producono, sull'ambiente di propagazione dalla sorgente alla Terra e, possibilmente, sui meccanismi fisici delle particelle ad energie molto al di sopra di quelle raggiungibili negli acceleratori creati dall'uomo. Completano lo scenario degli obiettivi scientifici di JEM-EUSO: lo studio dei campi magnetici galattici ed extragalattici, la rivelazione di neutrini e raggi gamma di energia estrema, la verifica della Relatività Speciale a fattori di Lorentz estremamente ampi, l'esame di possibili effetti della gravità quantistica ad energie estreme ed il monitoraggio sistematico dei fenomeni atmosferici.

L'obiettivo principale di JEM-EUSO è quello di dar vita ad un nuovo campo di astronomia e astrofisica che usi il canale particellare di energia estrema ( $10^{19.5} \text{ eV} < E < 10^{21} \text{ eV}$ ). JEM-EUSO è progettato per esplorare più di  $10^5 \text{ km}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{yr}$  oltre  $7 \times 10^{19} \text{ eV}$  durante i primi tre anni di operatività in cui, con le incertezze attuali, accumulerà tra 500 e 800 eventi con energia oltre  $5.5 \times 10^{19} \text{ eV}$ . Una tale statistica renderà possibili i seguenti obiettivi:

- identificazione di sorgenti dall'analisi ad alte statistiche della direzione di arrivo;
- misura degli spettri di energia da sorgenti individuali con meccanismi di accelerazione o emissione.

JEM-EUSO è progettato per identificare le origini degli EECRs dall'analisi ad

alta statistica della direzione di arrivo. Le particelle ad energia estrema sono solo leggermente deflesse dai campi magnetici intermedi (almeno nel caso dei protoni) e possono essere tracciate fino alle origini dalla misura delle direzioni di arrivo con un'accuratezza migliore di qualche grado. L'analisi della direzione di arrivo potrà essere effettuata seguendo due diversi approcci: l'analisi *point source* e quella dell'anisotropia globale.

L'analisi *point source* ricerca gli ammassi a piccola scala al livello di accuratezza dello strumento. Infatti, gli esperimenti AGASA (Takeda *et al.*, 1999 [65]), HiRes (Gorbunov *et al.*, 2006 [33]) e Auger riportano un'anisotropia a piccola scala ed una correlazione nella direzione di arrivo degli EECRs con gli AGNs (Auger Collaboration, 2007 [5] e 2010 [55]). JEM-EUSO, con una statistica più ampia alle energie più alte, dovrebbe identificare parecchie dozzine di ammassi individuali con decine di eventi associati ad ognuno di essi, che permetterà di correlare le sorgenti con oggetti astronomici noti.

Per una migliore analisi, l'esposizione dovrebbe essere uniforme su tutto il cielo. La ISS ha un'inclinazione di  $51.6^\circ$  e JEM-EUSO potrà osservare ugualmente sia l'emisfero Nord che quello Sud offrendo un'esposizione circa uniforme dell'intera sfera celeste.

Se le particelle di energia estrema provengono da distanze cosmologiche, come quelle di GRBs e AGNs, saranno scoperte parecchie dozzine di sorgenti uniformemente distribuite nel cielo. Se sono coinvolte le normali galassie, gli ammassi di galassie dovrebbero dominare il flusso e l'aumento dovrebbe invece apparire nelle direzioni di Vergine, Pesci, Perseo ed Ercole (Takami *et al.*, 2004 [64]). Se le sorgenti appartengono alla Via Lattea, la loro distribuzione mostrerebbe un aumento nella direzione del Sagittario.

D'altro canto, nello scenario Top-Down, le SHPs sono certamente Materia Oscura Fredda (CDM) e si suppone siano largamente distribuite con un aumento nella direzione del centro galattico, che può anche produrre particelle di energia estrema. Se la sorgente delle particelle di energia estrema è tale materia oscura

SHP, potrebbe essere concentrata nella nostra Via Lattea e potrebbe mostrare un aumento nella direzione del Sagittario (Berezinsky *et al.*, 1998 [14], Berezinsky *et al.*, 1998 [15] e Medina-Tanco *et al.*, 1999 [48]) e piccoli gruppi possono essere visti nella regione esterna (Navarro *et al.*, 1996 [53], Moore *et al.*, 1999 [51], Fukushige *et al.*, 2004 [29] e Diemand *et al.*, 2006 [25]).

### **Rivelazione di raggi gamma di energia estrema**

JEM-EUSO sarà il primo esperimento che permetterà di misurare flussi di raggi gamma di energia elevata. Inoltre molti modelli esotici, quale quello della Particella Super-Massiva (trattato nel ¶ 1.1.1) predicono un flusso di raggi gamma molto elevato ad  $E > 100 EeV$ . JEM-EUSO vincolerà tali modelli, ponendo dei limiti superiori più stringenti di quelli attuali.

### **Rivelazione di neutrini di energia estrema**

Una rivelazione di neutrini cosmogenici richiede un'apertura molto larga data la piccola sezione d'urto di questi ultimi. Oltre alla straordinaria capacità di rivelare EASs iniziati da protoni/Fe primari, JEM-EUSO servirà come prototipo per l'osservazione di eventi originati da neutrini primari. Come principio, i neutrini generati dal core di una sorgente astrofisica trasportano informazioni uniche sulla sorgente stessa. Ancora una volta il numero di neutrini che JEM-EUSO rivelerà durante il suo periodo di funzionamento, porrà dei limiti alle teorie attualmente contrastanti che provano a spiegare il funzionamento di base degli acceleratori astrofisici ad alto red-shift e che oggi hanno ben pochi riscontri provenienti dagli osservatori esistenti.

### **Studio del campo magnetico galattico**

Oggi si hanno pochi dati a disposizione, ma la misura diretta del campo magnetico galattico (GMF) tramite gli EECRs fornirebbe nuove ed importanti informazioni specialmente per regioni quali l'Alone Galattico; se JEM-EUSO

rivelasse molte sorgenti puntiformi luminose vicine, la struttura del GMF sarebbe direttamente vincolata dagli schemi dell'anisotropia e dalla deflessione delle traiettorie di particelle cariche dal GMF (Medina-Tanco *et al.*, 2009 [49]).

### Studio dell'atmosfera terrestre

La resa luminosa di fluorescenza e del segnale Cherenkov prodotti nello sviluppo in aria dagli EASs, così come l'efficienza di ricostruzione e gli errori, dipendono dalla trasparenza dell'atmosfera, dalla copertura nuvolosa e dall'altezza delle nubi. JEM-EUSO osserverà le condizioni atmosferiche nel campo di vista del telescopio facendo uso di un sistema di monitoraggio atmosferico all'avanguardia. In questo ambito verranno studiate: l'influenza dei raggi cosmici sulle formazioni nuvolose in entrambi gli emisferi e l'interazione delle polveri terrestri con i fenomeni atmosferici.

Altri due fenomeni di particolare interesse sono la brillantezza intrinseca del cielo notturno e i fulmini.

La brillantezza intrinseca del cielo notturno nella banda di lunghezze d'onda tra 330 e 400 nm è dominata dall'emissione di molecole di ossigeno nella banda Herzberg I attorno alla regione di confine ad un'altitudine di 95 km tra la mesosfera e la termosfera. A questo proposito bisogna ricordare che la brillantezza intrinseca del cielo notturno rappresenta il contributo fondamentale del segnale di fondo luminoso UV. Nel calcolo di questo segnale, si assume che la brillantezza intrinseca del cielo notturno ha un valore costante di  $500 \text{ fotoni} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{ns}^{-1}$  nell'intervallo  $\lambda = 300 \div 400 \text{ nm}$ ; questo valore deriva dalle osservazioni effettuate dal pallone BaBy (acronimo di Background Bypass, trattato in Catalano *et al.*, 2002 [23]), dal pallone NIGHTGLOW (Barbier *et al.*, 2005 [7]) e dal satellite Tatiana (Garipov *et al.*, 2005 [31]). Tenendo in considerazione le risposte delle ottiche e dei rivelatori della superficie focale di JEM-EUSO, il livello di segnale di fondo luminoso medio sui MAPMTs corrisponde a  $\sim 1 \text{ phe/pixel/GTU}$ .

Per quanto riguarda i fulmini, quando il riscaldamento della superficie ter-

restre porta ad una forte corrente ascensionale e ad una stratificazione instabile nella troposfera, si sviluppa un cumulonembo o una nube temporalesca per risolvere l'instabilità. Generalmente una nube temporalesca è un aggregato di celle convettive che accompagna una forte corrente ascensionale o discendente la cui velocità del vento raggiunge diverse decine di m/s. Ogni cella convettiva ha il suo ciclo di vita, che consiste nelle fasi di sviluppo, maturazione e decadimento. Durante la fase di sviluppo, le collisioni tra cristalli di ghiaccio, grandine e goccioline accelerano l'elettrificazione nella nube. Quando il campo elettrico tra gli strati interni carichi della nube temporalesca e tra la nube e il terreno superano la soglia del campo elettrico di scarica, avviene una scarica tra essi per neutralizzare le cariche. Tali fenomeni sono noti come scariche di fulmini. Recentemente i fenomeni di emissione luminosa causata da fulmini sono stati misurati con successo da vari satelliti e i risultati sono essenzialmente utilizzati per la climatologia, la scienza di prevenzione dei disastri e dei cicli acquatici ed altri campi di ricerca. JEM-EUSO sarà in grado di rivelare tali fenomeni luminosi e, in accordo con altri satelliti e stazioni di osservazione, si potranno ottenere evidenze osservative dirette del fatto che alcuni dei fenomeni meno noti (come i Narrow Bipolar Events<sup>1</sup>) siano generati dai raggi cosmici così come pure le scariche di fulmini.

Contemporaneamente il telescopio principale di JEM-EUSO sarà in grado di rivelare fenomeni luminosi transienti (TLE) che accadono nell'atmosfera a differenti scale temporali e spaziali e sono associati alle nubi temporalesche (come

---

<sup>1</sup>I Narrow Bipolar Events sono scariche elettriche altamente energetiche che avvengono ad altitudini elevate (tra 10 e 20 km) e sono associate ai temporali. Simili ad altre forme di fulmini, producono un'emissione ottica circa un'ordine di magnitudine più bassa.

Sprites<sup>2</sup>, Elves<sup>3</sup>, Halos<sup>4</sup> e Blue jets<sup>5</sup>). JEM-EUSO è quindi un'eccellente piattaforma per lo studio di molti fenomeni atmosferici così come della loro possibile connessione con la radiazione cosmica.

### Studio di meteoriti e meteore

La Terra è costantemente soggetta ad un processo di bombardamento da corpi interplanetari generalmente chiamati meteoriti. La maggior parte di questi corpi sono particelle di polvere sottile e non colpiscono il terreno, rimanendo essenzialmente visibili come meteore nel cielo notturno. Circa il 75% di tali eventi sono sporadici mentre un quarto delle meteore osservate sono associate ad un numero di sciami meteoritici che producono piogge di meteore in ben determinati periodi dell'anno e sono prodotti da corpi che hanno orbite molto simili, originati da un corpo genitore comune, generalmente una cometa.

I meteoriti colpiscono l'atmosfera terrestre a velocità ipersoniche tra 11 e 73 km/s e producono differenti fenomeni a seconda della velocità di ingresso e della massa del meteorite; tutti comunque derivano dalla conversione dell'energia cinetica del meteorite in altre forme di energia. Come regola generale vi è sempre un rilascio di ioni ed elettroni liberi lungo il percorso del meteorite nell'atmosfera, prodotti dalle collisioni del materiale sulla superficie dell'oggetto con gli atomi e le molecole dell'atmosfera; questo rende possibile rivelare tali eventi anche tramite tecniche radar. L'importanza dello studio di meteore e meteoriti deriva dal fatto che conosciamo solo una piccola frazione degli oggetti esistenti vicino alla Terra

---

<sup>2</sup>Gli Sprites sono scariche elettriche su vasta scala, che avvengono al di sopra delle nuvole temporalesche. Appaiono come lampi luminosi di colore rosso-arancione ed avvengono spesso in gruppi ad un'altitudine tra 50 e 90 km.

<sup>3</sup>Gli ELVES, acronimo di Emission of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources, sono dischi di luce in espansione ad una velocità vicina a quella della luce. Sono i più comuni tra i TLEs (Kuo *et al.*, 2008 [41]) e sono generati da una pulsazione elettromagnetica causata dalla scarica tra nuvola e terreno. Avvengono ad altitudini di 85-95 km ed il loro diametro medio è di circa 200 km.

<sup>4</sup>Gli Halos sono fenomeni che a volte precedono, per circa 1 ms, gli Sprites. Caratterizzati da emissioni più deboli, si estendono per circa 50 km in lunghezza e 10 km di spessore ed avvengono a circa 70 km di altitudine.

<sup>5</sup>I Blue jets differiscono dagli Sprites in quanto si proiettano dalla cima delle nuvole temporalesche, tipicamente in un cono stretto, fino ai livelli più bassi della ionosfera, tra 40 e 50 km di altitudine.

e per questo sono state costruite vaste reti di stazioni osservative sulla superficie terrestre, affette da numerosi problemi, quali la piccola area di cielo coperta dalle osservazioni e le condizioni climatiche che limitano l'efficienza. In questo contesto, JEM-EUSO può essere considerato il primo esempio di una nuova generazione di osservatori spaziali per la rivelazione delle meteore.

## 2.3 Precursori prototipi di JEM-EUSO

### 2.3.1 EUSO-Balloon



Figura 2.8: Fotografia raffigurante il prototipo EUSO-Balloon al momento del lancio.

Il prototipo EUSO-Balloon è nato per effettuare test del rivelatore JEM-EUSO in cielo prima della definitiva e finale installazione sulla ISS. Dopo lunghe fasi di studio a terra sia riguardo il rivelatore che il pallone stesso, il lancio è stato effettuato il 25 agosto 2014 dalla base di Timmins (Ontario, Canada) (come si può vedere in Figura 2.8). Il rivelatore è equipaggiato con una PDM di JEM-EUSO ed un sistema ottico formato da due lenti di Fresnel, in grado di coprire un campo di vista di  $\pm 5^\circ$ . Dopo 2 ore e 50 minuti di salita, fino ad un'altezza di 38300 m, il rivelatore ha cominciato ad acquisire dati per una durata di circa 5 ore (il volo è stato effettuato durante la notte, al fine di simulare le stesse condizioni in cui JEM-EUSO prenderà dati). Una volta terminato il volo - dopo circa 8 ore dal lancio - il pallone è ricaduto verso la Terra, ma grazie agli studi preliminari è stato guidato lentamente nella discesa, fino a cadere in un piccolo lago a circa 100 km

dal sito di lancio, senza riportare danni di alcun tipo. La missione ha acquisito circa 2.56 milioni di eventi (ognuno da 128 GTUs), registrando un totale di 83 GB di dati, mentre 8 GB di dati sono stati trasferiti a terra durante il volo (ad una velocità di 1.3 Mb/s), così come i dati telemetrici (tensioni di alimentazione, correnti e temperature).

### 2.3.2 EUSO-TA

Il progetto EUSO-TA nasce come prototipo di test e calibrazione del rivelatore JEM-EUSO presso il sito di Telescope Array. Nello specifico gli obiettivi sono:

- calibrazioni incrociate con Telescope Array, tramite metodi non invasivi;
- acquisizione di dati per una calibrazione assoluta, grazie al lidar o ai fasci laser;
- acquisizione di sciami in coincidenza con Telescope Array.



Figura 2.9: Fotografia raffigurante l'installazione delle lenti presso il sito di EUSO-TA.

EUSO-TA è un telescopio terrestre formato da una PDM (identica a quella usata per EUSO-Balloon) e due lenti di Fresnel, tramite cui saranno acquisite misure di luce UV nell'atmosfera in un campo di vista di  $\pm 4^\circ$  (come mostrato in Figura 2.9).

Tra Marzo e Luglio 2014 è stata effettuata l'integrazione a Parigi, ad Agosto 2014 i test ed il debug a Tokyo, mentre tra Ottobre e Novembre la vera e propria installazione presso il sito di TA in Utah, USA. Il 2015 sarà quindi dedicato alle prese dati in loco per una successiva analisi.

In caso di successo della campagna EUSO-TA, si potrebbe considerare anche l'opzione EUSO-Auger, ovvero l'installazione di un prototipo di JEM-EUSO nel sito dell'Osservatorio Pierre Auger in Argentina, Emisfero Sud.

### 2.3.3 Mini-EUSO

Il progetto Mini-EUSO nasce come precursore per misure di fondo luminoso UV in condizioni reali dalla ISS.

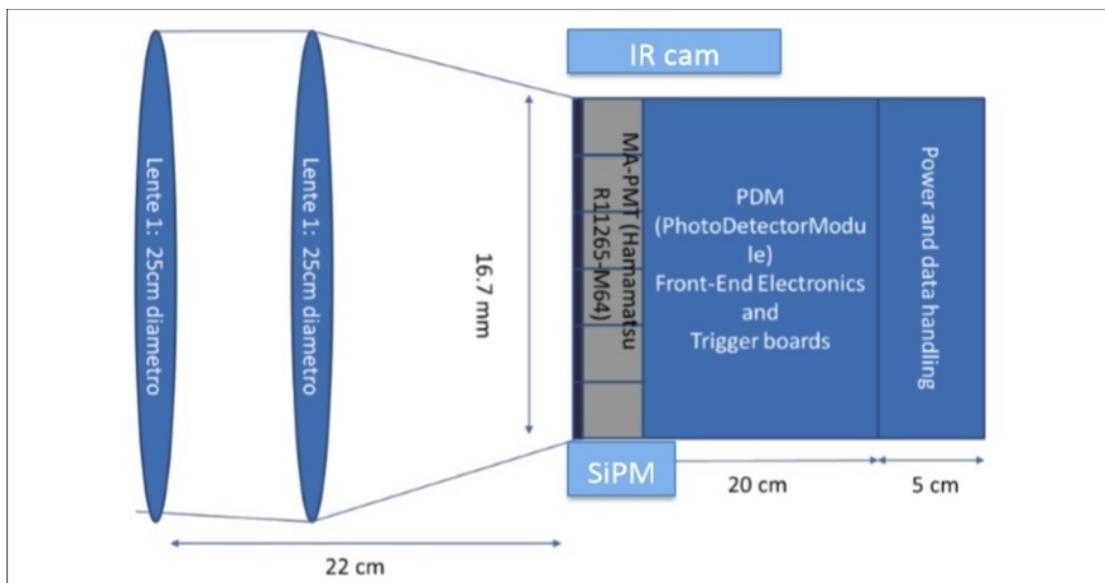


Figura 2.10: Schema concettuale del progetto Mini-EUSO.

Come si può vedere in Figura 2.10, il progetto Mini-EUSO è una riproduzione in miniatura del telescopio JEM-EUSO; dotato di due lenti di Fresnel del diametro

di 25 cm, focalizza la luce UV su una superficie focale realizzata con 1 PDM, a sua volta composta da 36 MAPMTs, per un totale di 2304 pixels. Sarà installato sul modulo russo Zvesda della ISS, dietro una finestra trasparente alla radiazione UV, in modo da osservare la Terra nelle stesse condizioni in cui opererà JEM-EUSO. Dopo una prima fase di sviluppo e realizzazione di un prototipo per test di laboratorio e di qualifica, verrà poi costruita la versione finale di volo. Il lancio è previsto tra il 2015 e il 2017.

Dopo l'approvazione sia dell'ASI che della ROSCOSMOS, si sono anche stilati gli obiettivi scientifici e tecnologici della missione:

- studio delle emissioni UV dalla Terra di notte;
- mappatura della Terra in UV;
- studio dei fenomeni atmosferici;
- studio sulla bioluminescenza di organismi animali e vegetali;
- studio sulle meteore;
- primo uso delle lenti di Fresnel nello spazio;
- ottimizzazione delle caratteristiche e delle prestazioni di EUSO;
- innalzamento del livello tecnologico dell'hardware (TRL).

## Capitolo 3

# Il Progetto EUSO@TurLab

Durante l'attività di Dottorato di Ricerca sono state effettuate undici trasferite presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Torino, dove è situato un laboratorio, in seguito denominato TurLab (descritto nel ¶ 3.1) o più in generale Progetto EUSO@TurLab, in cui sono state svolte tutte le misure presenti in questo lavoro.

Il laboratorio in esame è stato migliorato col passare del tempo, diventando un complesso sistema in grado di replicare un'ampia varietà di fenomeni che il telescopio JEM-EUSO potrà incontrare nelle sue orbite attorno alla Terra e studiarle in ambiente controllato. Nei paragrafi seguenti verrà quindi ampiamente descritto questo laboratorio.

### 3.1 TurLab

TurLab è un laboratorio, situato al quarto piano interrato (15 m sotto il livello del terreno) del Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Torino. Costruito originariamente per ospitare un acceleratore lineare, è stato successivamente ridestinato ad altri scopi, principalmente allo studio di eventi di fluidodinamica grazie alla vasca rotante installata in una parte di esso.

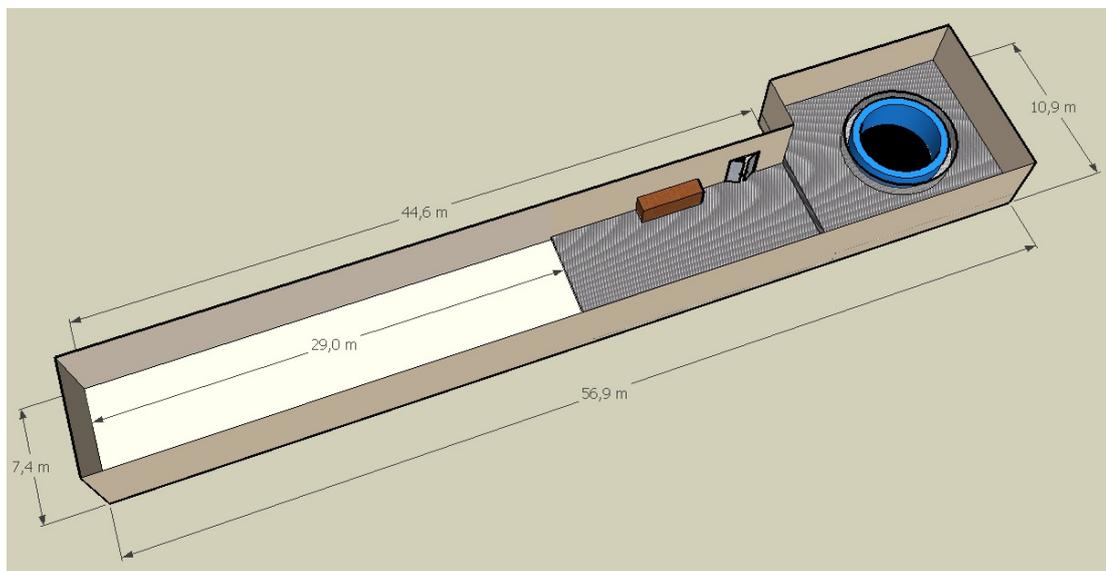


Figura 3.1: Riproduzione tridimensionale (effettuata tramite il programma di grafica tridimensionale SketchUp) del locale ospitante il TurLab, con annesse misure delle sue dimensioni, acquisite in loco tramite livella laser.

Com'è possibile osservare nella Figura 3.1, le dimensioni sono molto ampie, dando così spazio alle varie fasi di miglioramento del set-up sperimentale avvenute nel tempo e descritte nei paragrafi seguenti.

### 3.1.1 Prototipo

All'inizio del lavoro e per le prime due campagne di misure, l'apparato sperimentale consisteva in una scatola nera, perfettamente sigillata per evitare l'entrata della luce dall'esterno; all'interno erano presenti:

- un LED ultravioletto di lunghezza d'onda pari a 370 nm (denominato LED UV), alimentato tramite un generatore di tensione regolabile, e la cui luce era focalizzata tramite un cannoncino con una apertura di circa 0.2 mm di diametro;
- uno specchietto rotante, in grado di riflettere la luce del LED in varie direzioni e creare delle strisce di luce;
- un MAPMT da 5x5 pixels, delle dimensioni di 1 pollice quadrato.

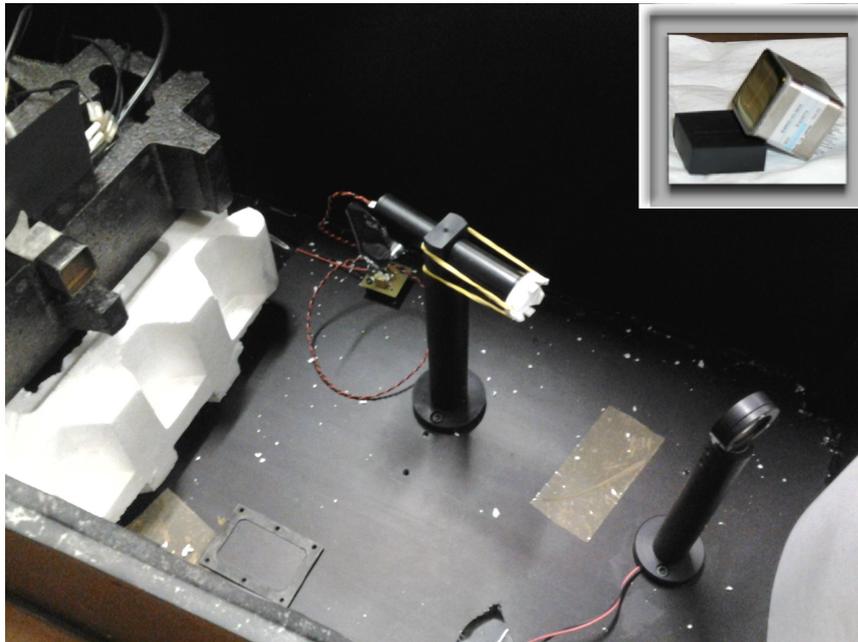


Figura 3.2: Fotografia dell'interno del prototipo, con lo specchietto rotante sulla destra, il cilindretto con il LED UV al centro ed il MAPMT sulla sinistra, inserito in un supporto. In alto a destra viene mostrato il dettaglio del MAPMT utilizzato.

La Figura 3.2 rappresenta un'immagine della strumentazione in esame ed il dettaglio del MAPMT da 25 pixels utilizzato.

Oltre la scatola nera, erano presenti l'elettronica (descritta nel ¶ 3.1.2) ed un computer con installato il programma LabVIEW<sup>1</sup>, per l'acquisizione e conservazione dei dati, il cui schema è mostrato nella Figura 3.3.

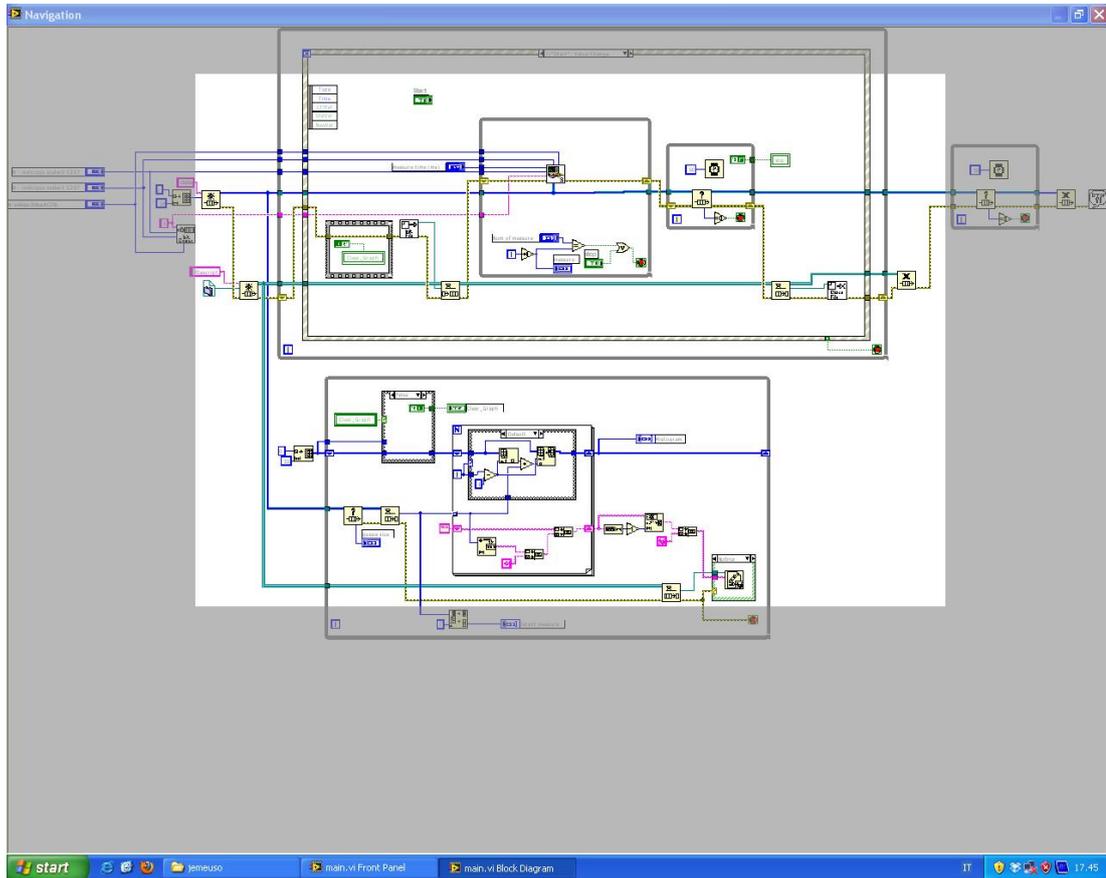


Figura 3.3: Diagramma a blocchi del programma scritto tramite LabVIEW, usato per l'acquisizione dei dati sul computer collegato all'elettronica.

<sup>1</sup>LabVIEW è un software per la progettazione di sistemi che utilizza icone, terminali e collegamenti; include strumenti basati sulla configurazione e funzioni di programmazione avanzate per lo sviluppo di applicazioni di controllo, analisi e misura con interfacce utente professionali.

### 3.1.2 Elettronica

L'elettronica utilizzata sia per il prototipo che per il set-up definitivo è mostrata in Figura 3.4.

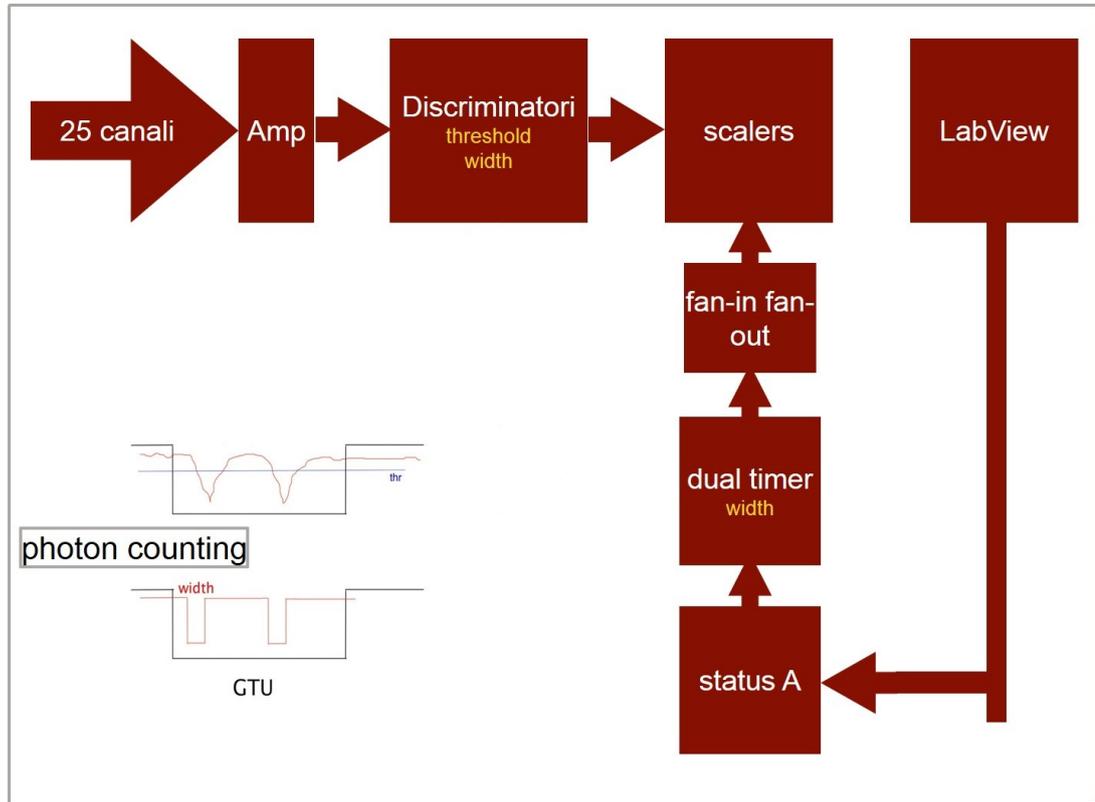


Figura 3.4: Schema a blocchi dell'elettronica di lettura e acquisizione dati utilizzata per il progetto EUSO@TurLab.

I segnali luminosi vengono acquisiti dal MAPMT da 25 pixels; ogni pixel è collegato, tramite cavi e connettori (LEMO e BNC) di circa 25 m, ad un set-up elettronico (mostrato in Figura 3.5) costituito da un rack (la torre in figura), contenente un CRATE CAMAC (Computer Automated Measurement And Control, situato nella parte superiore della figura ed interagente con il computer) ed un CRATE NIM (Nuclear Instrumentation Module, situato nella parte inferiore della figura ed interagente con l'utente), ognuno dei quali composto da vari moduli associati.

I segnali in arrivo vengono amplificati di un fattore 10 tramite un Amplifi-

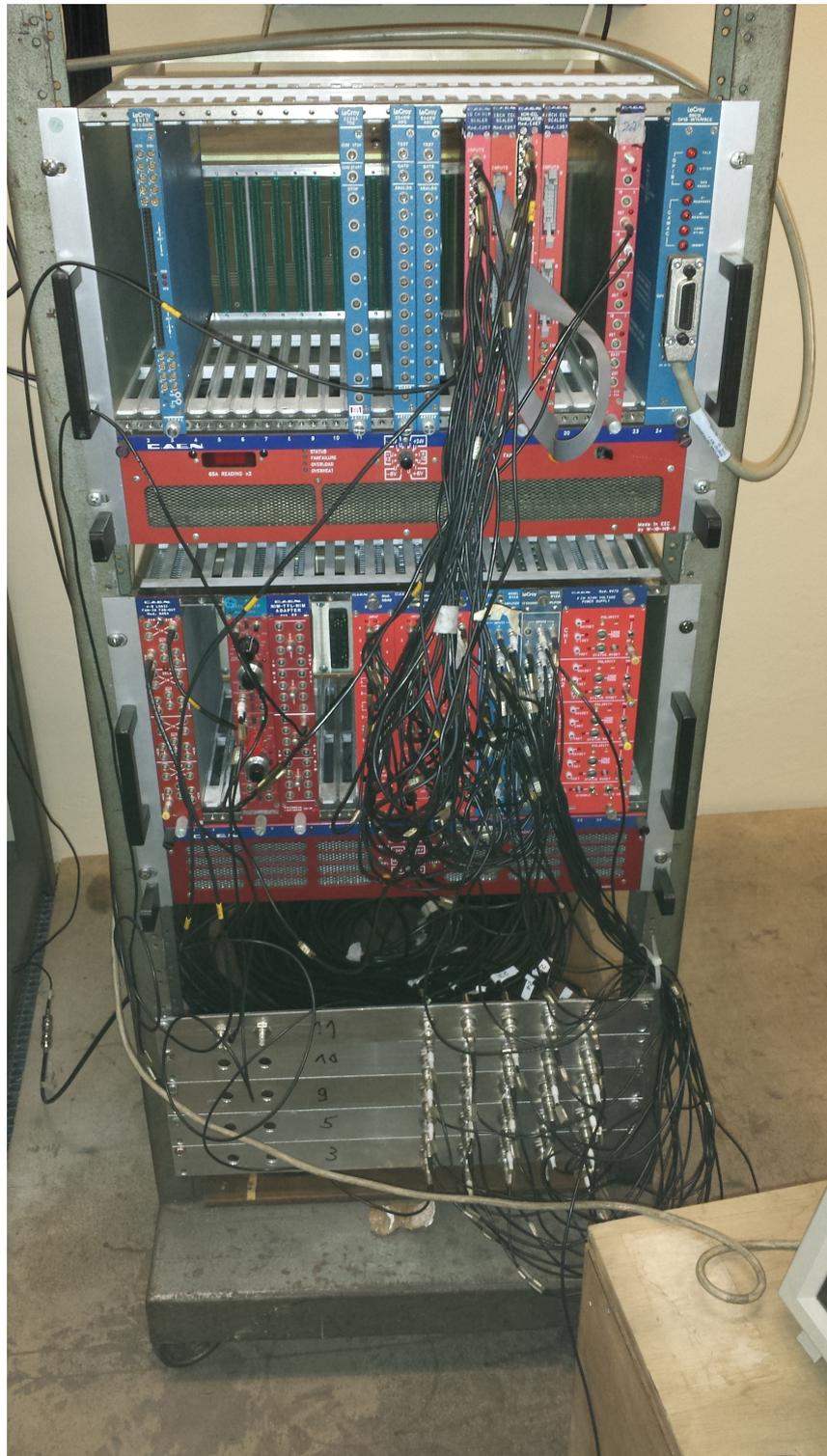


Figura 3.5: Fotografia dei moduli dove alloggia l'elettronica utilizzata.

catore LeCroy e successivamente vengono discriminati tramite un Discriminatore, in cui le soglie sono fissate per ogni pixel tra 20 e 30 mV (sono fissate in modo tale da trovarsi nella valle tra il rumore ed il segnale di singolo fotoelettrone). Ogni discriminatore infatti ha un segnale per ogni evento che supera la soglia (fissata da noi per ogni canale). Per ogni evento di questo tipo, il segnale viene acquisito sugli scalers e conta quindi quante volte viene superato il livello del discriminatore.

Gli eventi vengono contati in un tempo predefinito, deciso tramite il dual timer (circuitto che identifica la finestra temporale in cui gli scalers registrano gli eventi).

Nell'elettronica utilizzata, ogni segnale ha una larghezza di 400 ns e la finestra viene aperta per 40  $\mu$ s; questa scelta è stata fatta al fine di riprodurre il fattore 100 dell'elettronica originale di JEM-EUSO, dove la finestra è la GTU (2.5  $\mu$ s) ed i segnali discriminati hanno una larghezza di 25 ns.

Fissare la larghezza definisce la *double pulse resolution* (capacità di discriminare tra due eventi separati temporalmente): se due segnali differenti arrivano a meno di 400 ns l'uno dall'altro, vengono contati come fosse uno solo. Questo perchè si lavora in regime di *single-photon counting*; se invece si lavorasse con un ADC (convertitore analogico-digitale), il sistema funzionerebbe tramite integrazione di carica, ma potrebbe generare problemi con i PMTs e le differenze di efficienza per la rivelazione.

Contando quanti eventi discriminati da 400 ns ci sono in una finestra da 40 $\mu$ s, idealmente si otterrebbero 100 eventi, quindi potrebbero arrivare 100 fotoni all'interno della finestra; in realtà è un processo casuale, per cui si arriva al massimo alla rivelazione di circa 60 fotoni (oltre cui si possono avere fenomeni di saturazione di segnale).

Altro elemento importante dell'elettronica è il cosiddetto *fan-in fan-out*, il quale comunica agli scalers quando arrestare l'acquisizione; avendo 3 scalers, si deve agire in parallelo ed il *fan-in fan-out* è in grado di gestire questi comandi.

Il programma LabVIEW infine agisce sullo status A, che è paragonabile ad

un semaforo, il cui compito è quello di abilitare e disabilitare i conteggi da effettuare. Lo status A quindi attiva il dual timer, aprendo e chiudendo la finestra da  $40 \mu s$ ; dopo la chiusura, il programma LabVIEW richiede i risultati conservati nella memoria dell'elettronica e, una volta scaricati all'interno del computer i dati dell'intera GTU, riapre lo status A per una nuova acquisizione.

La problematica più gravosa riscontrata in questo sistema (presentata nel Capitolo 4) è il fatto che si è riscontrato un tempo morto, necessario all'elettronica per comunicare i dati acquisiti al computer, di circa  $30 \text{ ms}$ , per cui nonostante la finestra sia di soli  $40 \mu s$ , è possibile effettuare acquisizioni solo ogni  $30 \text{ ms}$ . Pertanto il tempo in cui lo strumento è attivo è solo di circa l'uno per mille ( $40 \mu s / 30 \text{ ms}$ ). Come conseguenza, ogni segnale fisico che si vuole riprodurre deve avere una durata almeno 3 ordini di grandezza superiore alla durata reale per poter campionare l'evento in tutta la sua evoluzione tenuto conto dell'efficienza dell'uno per mille.

### 3.1.3 Vasca Rotante

Il set-up sperimentale definitivo utilizza una vasca rotante già presente nel laboratorio.

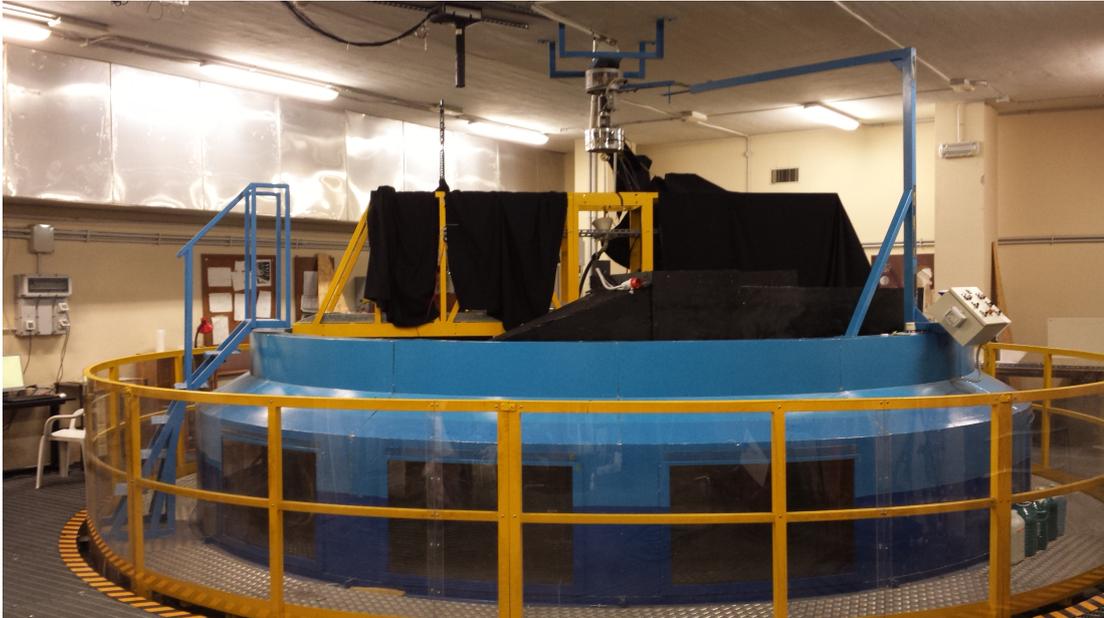


Figura 3.6: Fotografia della vasca rotante, in cui è possibile vedere anche il fototubo appeso al soffitto e parte della strumentazione utilizzata per le varie misure.

Com'è possibile vedere nella Figura 3.6, la vasca è composta da più elementi; all'esterno si trova una passerella metallica, delimitata internamente da una struttura circolare ed esternamente da una ringhiera; la struttura è corredata anche di una scaletta e di un sostegno di collegamento con il perno centrale; infine la parte più interna, composta dalla vasca vera e propria, del diametro di circa 5 metri, poco visibile nella Figura 3.6, e da alcune strutture che compongono una passerella e la strumentazione per generare vento in grado di creare onde quando è presente l'acqua. Per i nostri scopi la struttura circolare, legata alla passerella esterna, viene tenuta fissa, mentre viene messa in rotazione solo la parte interna; tale rotazione avviene grazie all'accensione iniziale di una pompa ad olio, in grado di creare un sottile strato d'olio sotto la vasca e quindi sollevare la struttura, il cui peso è di 10 tonnellate circa. Viene quindi attivato un motore elettrico trifasico,

legato al perno centrale, in grado di far ruotare la vasca interna ad una velocità regolabile da un massimo di una rotazione nell'arco di 12 secondi ad un minimo di una rotazione in circa 20 minuti (vedi tabella 3.1); il velo d'olio assicura un movimento quasi esente da vibrazioni.

	Velocità di rotazione	Velocità (m/s)
Minima velocità	1 rotazione in 20 minuti	$10^{-2}$
Velocità intermedia	1 rotazione in 2 minuti	$10^{-1}$
Massima velocità	1 rotazione in 12 secondi	1

Tabella 3.1: Tabella di conversione tra le velocità di rotazione della vasca. Da un lato sono elencate alcune velocità di rotazione utilizzate; dall'altro le corrispondenti velocità in m/s (in corrispondenza di un raggio di 2 m, dove è posizionato il PMT).

La vasca ruota in senso antiorario e la velocità di rotazione viene controllata digitalmente tramite uno speciale software per pc, anche se è possibile controllare la rotazione manualmente. La vasca può essere riempita con acqua o altri fluidi fino ad un'altezza di 75 cm.

Per quanto riguarda la strumentazione in grado di generare vento, essa è stata montata in un secondo momento, per esperimenti di fluidodinamica (all'interno del progetto EuHIT) e consiste di una serie di pannelli in sughero dalla forma a spicchio che chiudono la parte sommitale della vasca interna (per evitare dispersioni del vento) e di due motori legati a due ventole di velocità regolabile (da 0 Hz fino a 50 Hz), in grado di generare vento all'interno della vasca (vedi tabella 3.2). La strumentazione è approfondita in Stramignoni, 2013 [63].

Regolazione (Hz)	Velocità (m/s)
15	2
20	3
27	4
34	5
42	6
50	9

Tabella 3.2: Tabella di conversione tra le velocità del vento generato dai motori. A sinistra sono elencate alcune velocità di rotazione delle ventole in Hz; a destra le corrispondenti velocità in m/s.

Per informazioni più dettagliate è possibile consultare il sito del laboratorio [67], in cui sono presenti le specifiche della vasca, del laboratorio e degli esperimenti in atto.

## 3.2 Set-Up Sperimentale

Durante le campagne di misure, che verranno descritte nel Capitolo 4, è stato riprodotto un vasto numero di eventi e condizioni, che saranno elencati e descritti in questa sezione.

La vasca riproduce la superficie terrestre, sulla quale sono state ricreate diverse condizioni ambientali, semplicemente installando apparecchiature o appoggiando su essa diversi materiali, che il rivelatore JEM-EUSO potrà incontrare nelle sue orbite attorno alla Terra. La rotazione della ISS viene riprodotta tramite la rotazione della vasca, ipotizzando in tal modo un sistema di riferimento invertito.



Figura 3.7: Fotografia del fototubo fissato al soffitto.

Il rivelatore JEM-EUSO è invece riprodotto tramite un fototubo fissato al soffitto (com'è possibile vedere nella Figura 3.7); la strumentazione è composta da una scatola nera perfettamente sigillata, all'interno della quale è situato il PMT da 25 pixels, da un tubo nero in corrispondenza del PMT (con funzione di collimatore di luce) e, nella parte inferiore del tubo, da una piccola lente piano-convessa (la KPX112 della Newport, il cui diametro è di 25.4 mm e la cui lunghezza focale

effettiva è di 300 mm) in grado di focalizzare la luce proveniente dall'esterno sul PMT senza ulteriori diffrazioni o dispersioni. Il PMT, con la lente, ha un campo di vista pari a circa la sua misura, un pollice quadrato, per cui ogni pixel vede  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  ad una distanza di 2 m. L'angolo solido è quindi dell'ordine di  $10^{-6} \text{ sr}$ , la stessa grandezza dell'angolo solido di un pixel di JEM-EUSO. Confrontando le estensioni lineari del campo di vista di un pixel di TurLab e di JEM-EUSO, si trova che il rapporto dei due è  $(5 \text{ mm} / 500 \text{ m}) \sim 10^{-5}$ , ossia la stessa grandezza del rapporto tra la velocità della vasca e quella della ISS, se la vasca compie una rotazione completa in circa 3 minuti ed il telescopio viene posizionato a 2 m dal centro della vasca (configurazione standard di tutto il lavoro). L'intera struttura è ancorata tramite due alette della scatola, che permettono di fare scorrere il tutto sulle guide montate saldamente sul soffitto, in modo tale da consentire la regolazione e il centramento del fototubo rispetto alla vasca, a seconda delle esigenze. A sua volta il fototubo è collegato all'elettronica tramite dei cavi lunghi circa 25 metri, fatti scorrere sulle pareti in modo tale da non creare intralcio all'intera struttura.



Figura 3.8: Fotografia dei materiali utilizzati per riprodurre differenti sorgenti di segnale luminoso di fondo.

Per la riproduzione di condizioni ambientali differenti (ed il loro albedo<sup>2</sup>) sono stati usati svariati materiali, come possiamo vedere nella Figura 3.8; il muschio per riprodurre le foreste, la polvere di vetro per i ghiacciai, la sabbia per i deserti, i mattoni per le savane e materiali bianchi o riflettenti che, se opportunamente illuminati, possono riprodurre città o altri eventi di intensa luminosità.

Per riprodurre anche condizioni atmosferiche specifiche, quali nuvole, nebbia, ecc., sono state utilizzate delle vaschette riempite d'acqua, in cui sono state create delle sospensioni di particelle tramite la sedimentazione tra due strati d'acqua di salinità differenti, com'è possibile vedere nella Figura 3.9.

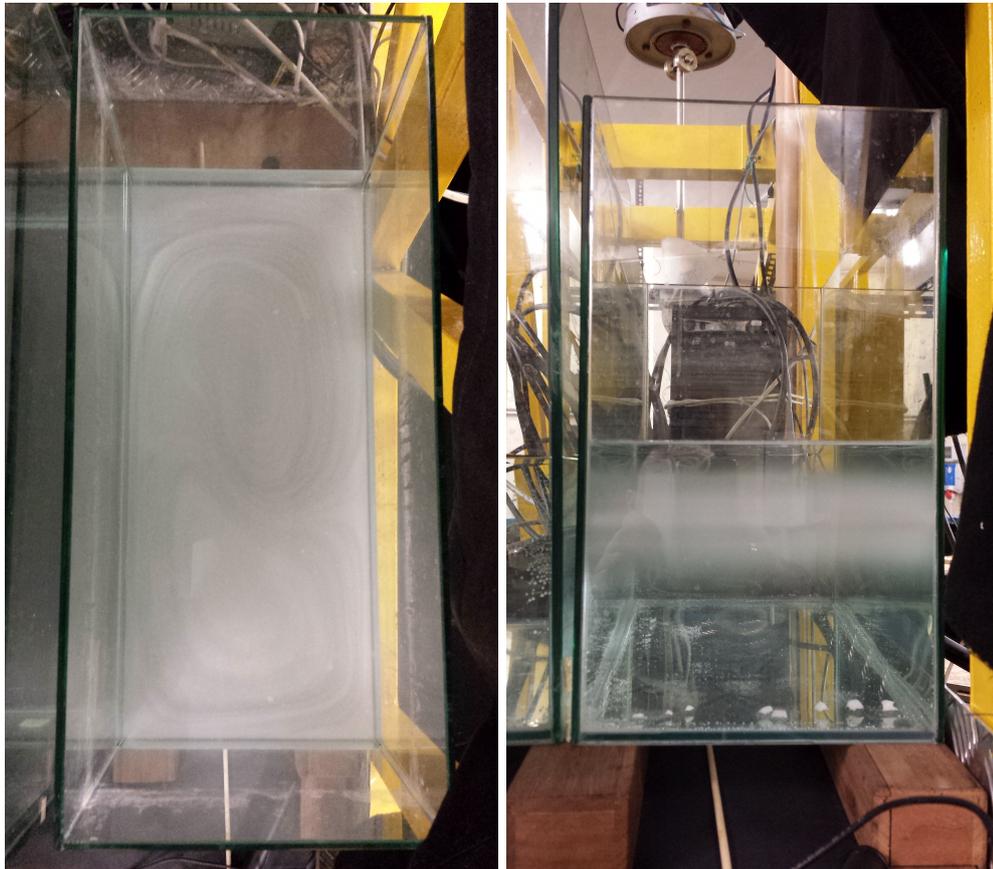


Figura 3.9: Fotografie della vaschetta d'acqua in cui è stata ricreata una sospensione di particelle tra due strati d'acqua di salinità differenti.

<sup>2</sup>L'albedo di una superficie è la frazione di luce o, più in generale, di radiazione incidente che viene riflessa in tutte le direzioni. Essa indica dunque il potere riflettente di una superficie. L'esatto valore della frazione dipende, per lo stesso materiale, dalla lunghezza d'onda della radiazione considerata.

Per riprodurre eventi di piccole e grandi dimensioni sono stati usati i LEDs. Come si può vedere nelle figure 3.10 e 3.11, i LEDs sono stati montati all'interno di cilindri di diverse dimensioni, dipendentemente dall'effetto che si voleva ricreare. Nel caso di eventi di vaste dimensioni, come città, è stato sufficiente montare un LED (in questo caso un LED rosso di lunghezza d'onda pari a 626 nm, denominato LED rosso) nella parte inferiore di un cilindro, in modo che la luce fosse rivolta verso l'alto, così da ottenere uno spot luminoso più ampio del fototubo e generare così un evento più grande dell'angolo solido visto dal PMT. Nel caso di eventi di piccole dimensioni, come meteore o raggi cosmici, è stato utilizzato un cilindretto più piccolo con un tappo nella parte sommitale, in cui è stato praticato un foro centrale delle dimensioni di circa 0.2 mm, in modo tale da avere uno spot di luce molto concentrato, dell'ordine di circa un pixel, quando osservato dal PMT.

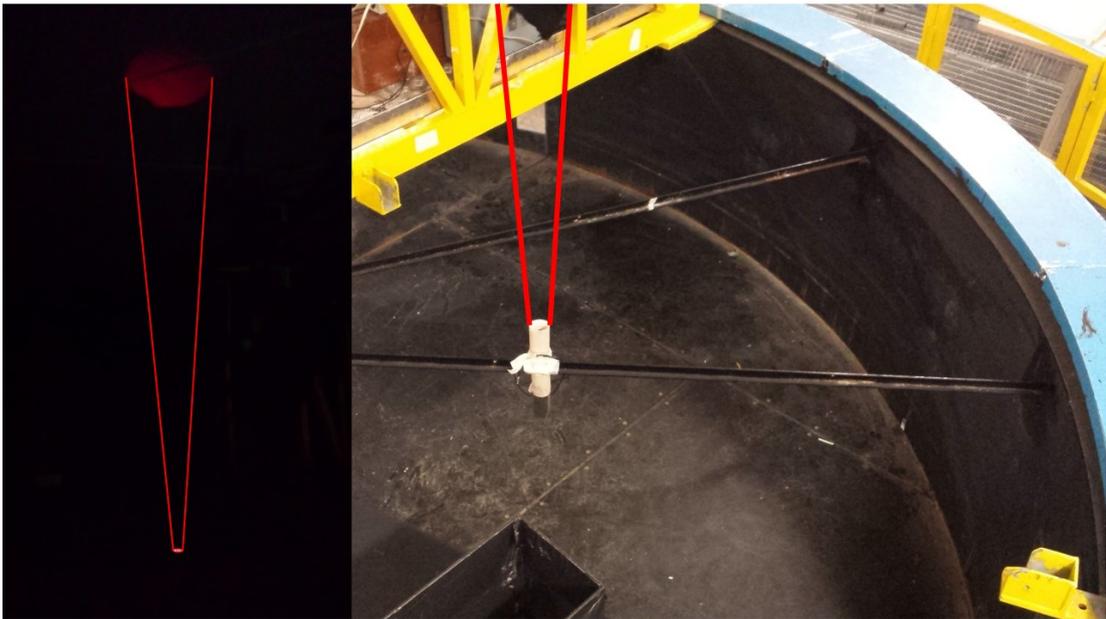


Figura 3.10: Fotografia del sistema cilindro-LED rosso per la riproduzione di eventi di vaste dimensioni, come le città. Nell'immagine è possibile vedere il cilindro ancorato ad una delle aste della vasca su cui si incastrano le coperture di legno nella configurazione in presenza di vento; sulla sinistra si vede l'effetto del sistema in condizioni di buio, con il piccolo spot rosso in basso da cui fuoriesce la luce del LED rosso e l'ampio spot in alto, all'arrivo sul soffitto.



Figura 3.11: Fotografia del sistema cilindretto-LED UV per la riproduzione di eventi di piccole dimensioni, come meteore e raggi cosmici. È possibile vedere il cilindretto ancorato in cima ad un supporto metallico, con la luce del LED UV orientata verso l'alto e il fototubo ancorato al soffitto; con la rotazione della vasca i due sistemi si incrociano, creando così una striscia di luce.

Sono poi stati utilizzati ulteriori strumenti per la riproduzione di eventi specifici che si muovessero indipendentemente dalla rotazione della vasca (per cui è stato possibile effettuare misure anche in condizioni di vasca ferma) tra cui un oscilloscopio analogico, su cui è stata generata una figura di Lissajous (vedi Figura 3.12) e soprattutto la piattaforma Arduino, che sarà descritta nel seguito.

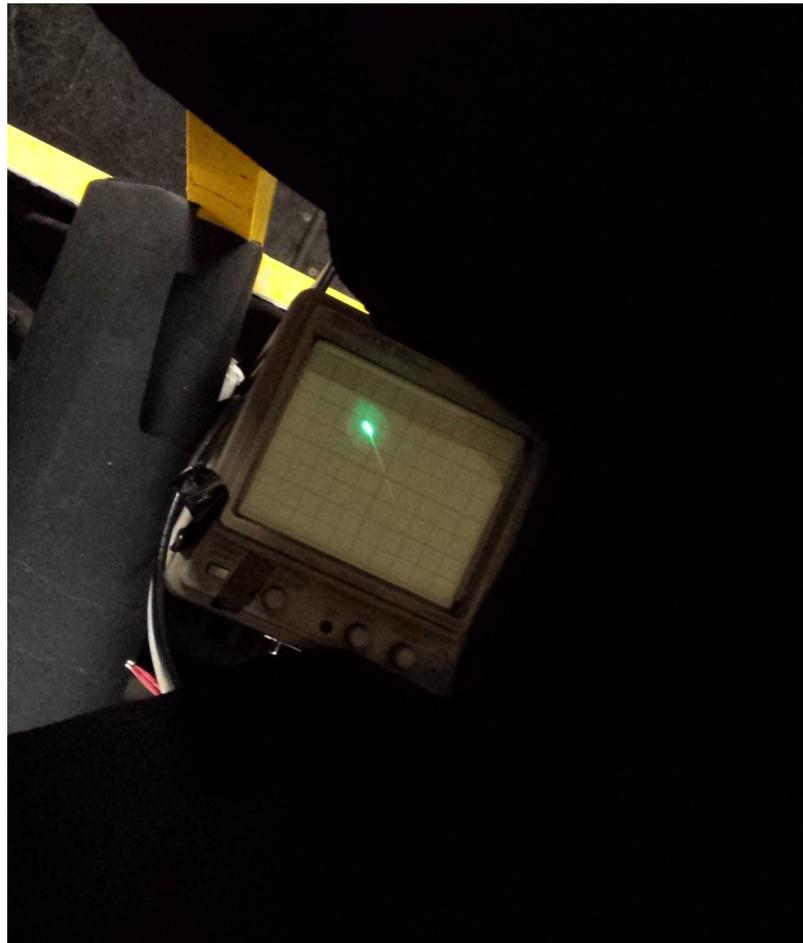


Figura 3.12: Fotografia della figura di Lissajous, creata tramite un oscilloscopio analogico, per la riproduzione di un evento veloce in movimento.

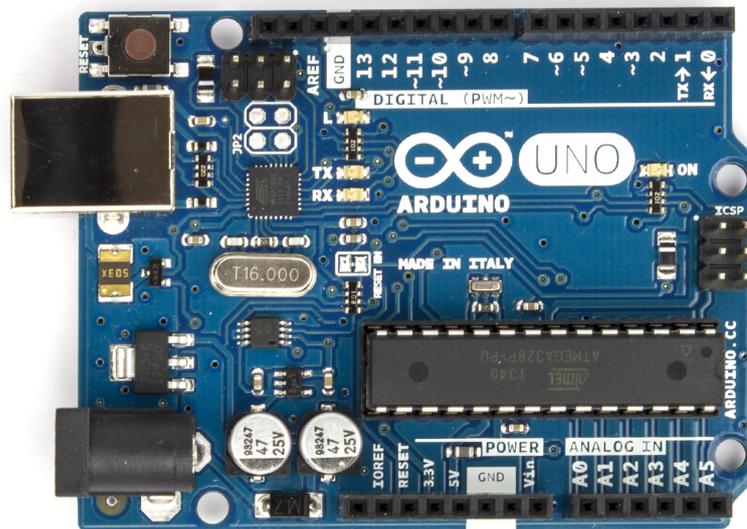


Figura 3.13: Immagine della piattaforma Arduino, nello specifico la versione Arduino Uno, utilizzata per la riproduzione artificiale di alcune sorgenti di luce (raggi cosmici, Elves, ecc.).

Arduino [4] è una piattaforma elettronica open-source di piccole dimensioni basata su un hardware ed un software di facile utilizzo, rivolta a chiunque voglia effettuare progetti interattivi (vedasi Figura 3.13). L'hardware si basa su un circuito stampato, fornito di un microcontrollore AVR a 8-bit con pin connessi a delle porte di ingresso/uscita (I/O - input/output), un regolatore lineare di tensione a 5 volt ed un'interfaccia USB per la comunicazione con un computer, oltre alla circuiteria di contorno; il software, chiamato Wiring e derivato dai linguaggi C e C++, è intuitivo e liberamente scaricabile e modificabile. È possibile realizzare con essa semplici dispositivi indipendenti come controllori di luci, di velocità, sensori di luce, temperatura e umidità e molti altri progetti che utilizzano sensori, attuatori e comunicazione con altri dispositivi. In questo lavoro è stato utilizzato per programmare l'accensione di una striscia di LEDs di luce bianca, in sequenza (vedasi Figura 3.14) con intervalli di tempo variabili a seconda delle necessità, infatti la piattaforma Arduino è in grado di fornire tensione ad un singolo LED

per un intervallo di tempo minimo di circa  $5 \mu\text{s}$  (stesso ordine di grandezza della GTU di JEM-EUSO).

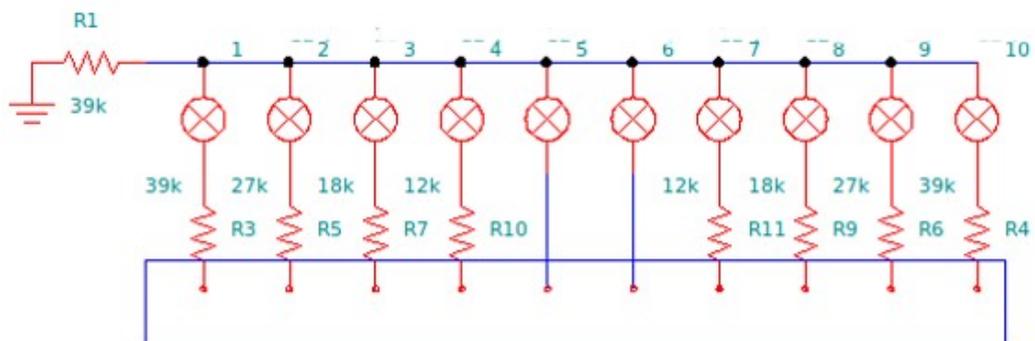
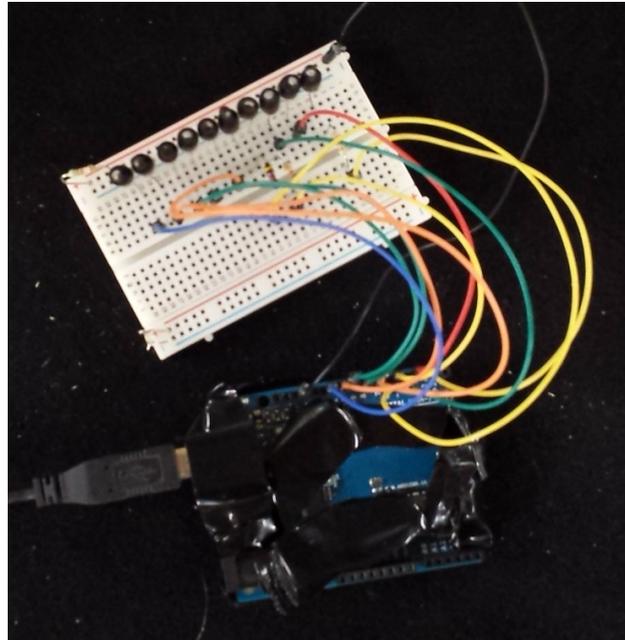


Figura 3.14: Nella prima immagine: fotografia della piattaforma Arduino collegata ad un circuito stampato millefori con una fila di 10 LEDs di luce bianca, accesi in sequenza per riprodurre una striscia di luce. Nella seconda immagine: schema elettrico del circuito utilizzato.

## Capitolo 4

# Misure e Analisi Dati

Durante l'attività di ricerca del Dottorato sono state effettuate delle campagne di misura presso il laboratorio TurLab (descritto nel ¶ 3.1). Esse sono state dedicate al miglioramento della strumentazione presente in loco, alla riproduzione di un vasto numero di fenomeni che il rivelatore JEM-EUSO potrà osservare a bordo della Stazione Spaziale Internazionale ed alla loro acquisizione, al fine di verificare il trigger di primo livello.

Innanzitutto, per brevità e completezza saranno ora elencate sinteticamente le campagne di misure effettuate presso il TurLab:

1. Novembre 2012: misure tramite set-up semplificato (prototipo con LED, specchio rotante e PMT) con un solo pixel;
2. Marzo 2013: miglioramento del set-up sperimentale per l'acquisizione contemporanea di 23 pixels;
3. Luglio 2013: realizzazione del primo set-up sperimentale con l'utilizzo della vasca rotante;
4. Settembre 2013: misure di fondi ambientali fissi e variabili con vasca in rotazione;
5. Ottobre 2013: miglioramento del set-up tramite l'utilizzo di LEDs per la riproduzione di raggi cosmici ed altri eventi;

6. Novembre 2013: misure di rotazioni complete della vasca con riproduzioni di raggi cosmici, città e fulmini;
7. Dicembre 2013: studio della risposta del PMT in presenza di riflessioni di luce da superfici liquide con e senza onde e con e senza sospensioni di particelle;
8. Gennaio 2014: misure di riproduzioni di condizioni atmosferiche (nuvole, nebbia), utilizzo di oscilloscopi e piattaforma Arduino, rotazioni complete con tutte le sorgenti a disposizione per riprodurre orbite complete;
9. Febbraio 2014: studio sistematico delle onde e della piattaforma Arduino;
10. Maggio 2014: analisi approfondita dei dati, studio della piattaforma Arduino e dell'algoritmo di trigger;
11. Luglio 2014: misure delle perturbazioni ondose dell'acqua in diverse condizioni di luminosità ambientale.

Ogni campagna di misure sarà riportata nel seguito, descrivendo in modo approfondito le migliorie apportate di volta in volta, sintetizzando l'ingente quantità di dati acquisiti e mostrando i risultati più significativi, ottenuti tramite le successive analisi dei dati e revisioni critiche delle misure effettuate in loco.

## 4.1 Prima campagna di misure

Durante la prima campagna di misure (Novembre 2012) il set-up sperimentale era composto solo dal prototipo (descritto nel ¶ 3.1.1), collegato all'elettronica ed al computer, su cui era installato il software LabVIEW, con una versione base del programma di acquisizione dei dati. In tale occasione ci si è rivolti ad uno studio sistematico dell'apparato a disposizione, variando i parametri presenti. In tale circostanza era possibile solo l'acquisizione con un singolo pixel.

Sono stati acquisiti vari insiemi di dati, variando la tensione di alimentazione del LED UV tra 3.2 e 4.0 V (al di sotto dei 3.2 V il LED UV non aveva tensione

sufficiente per accendersi, mentre a 4.0 V vi erano i primi segnali di saturazione) e variando la velocità dello specchietto rotante tra 0.2 V e 2.0 V (corrispondenti rispettivamente a circa 3.5 e 35 rotazioni al secondo).

Lo specchietto aveva la funzione di creare dei picchi di segnale rispetto al fondo, quasi nullo all'interno della scatola nera; a tensioni differenti del LED corrispondevano quindi altezze differenti di tali picchi (raffiguranti eventi luminosi brevi); si è quindi provato a variare progressivamente la tensione per ottenere andamenti di segnale in crescita.

Fermando e successivamente smontando lo specchietto rotante e montando invece un foglio di carta bianco curvato (in grado di diffondere la luce proveniente dal LED), si è provato a riprodurre il fondo cielo, senza la presenza di picchi e sono state effettuate misure con fondo fisso e con fondo variabile. Tra i risultati più interessanti ottenuti durante questa prima campagna vi sono: la riproduzione del fondo cielo in assenza di fonti luminose tramite una misura lunga (16 ore di acquisizione) e la riproduzione del passaggio del rivelatore sopra una zona con presenza di fonti luminose, come ad esempio un'isola in mezzo al mare (qui sono state scelte le isole Eolie).

La misura lunga di fondo cielo (i cui grafici sono mostrati nella Figura 4.1) è stata effettuata a tensione costante, tramite acquisizione del pixel più efficiente, che è quello centrale (pixel 13). Questa misura ha messo in evidenza che, nonostante il prototipo fosse perfettamente sigillato dal punto di vista luminoso, alcuni picchi si presentano comunque all'interno della misura, probabilmente derivanti da eventi esterni. Inoltre la non corrispondenza tra il tempo di acquisizione (16 ore) e le GTUs acquisite ( $\sim 4.65 \cdot 10^6$  eventi) dimostra come l'elettronica non riesca a recuperare tutti i dati in perfetta sequenza; scelta una  $GTU = 10 \text{ ms}$ , ci si sarebbe aspettati infatti di ottenere un numero di eventi pari a  $5.76 \cdot 10^6 = (16 \text{ ore} \cdot 60 \text{ minuti} \cdot 60 \text{ s} \times 100 \text{ GTU/s})$ , mentre ne sono state contate solo l'81% circa. Da ulteriori prove effettuate si è poi notato che il problema peggiora quanto più la finestra di acquisizione diventa piccola; ciò porta

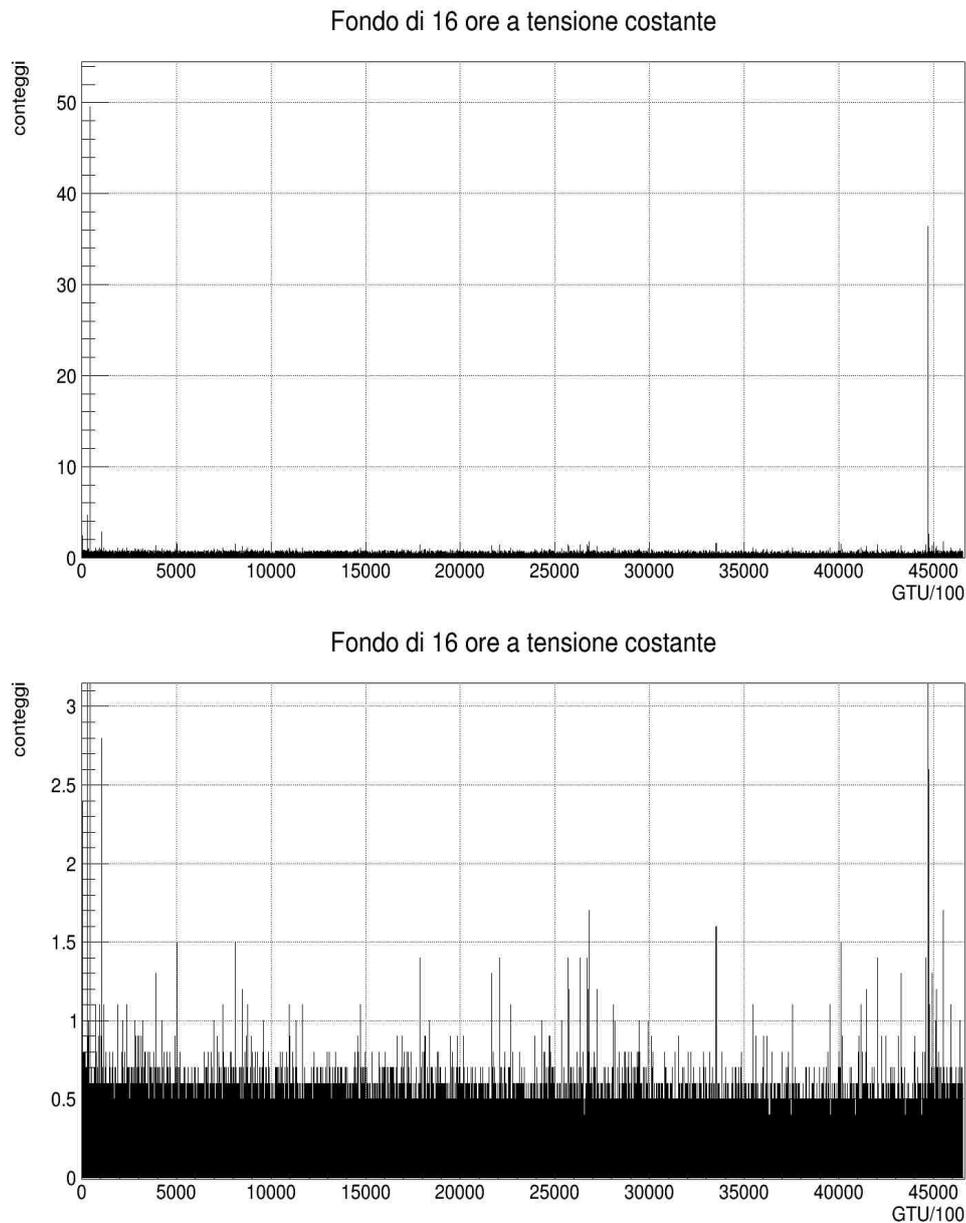


Figura 4.1: Grafici della riproduzione di fondo cielo, ottenuta nel prototipo. Il LED UV è alimentato con una tensione di circa 3.2 V, la finestra di acquisizione fissata a 10 ms ed il tempo di acquisizione pari a 16 ore; il secondo grafico è l'ingrandimento del primo lungo l'asse delle y, al fine di mostrare la costanza del fondo.

ad una prima consapevolezza, confermata in seguito, che esiste un tempo morto nella comunicazione tra elettronica e computer.

Il passaggio sulle isole Eolie (il cui grafico è mostrato nella Figura 4.2) è stato effettuato con tensione lentamente variabile (manualmente, con un voltmetro

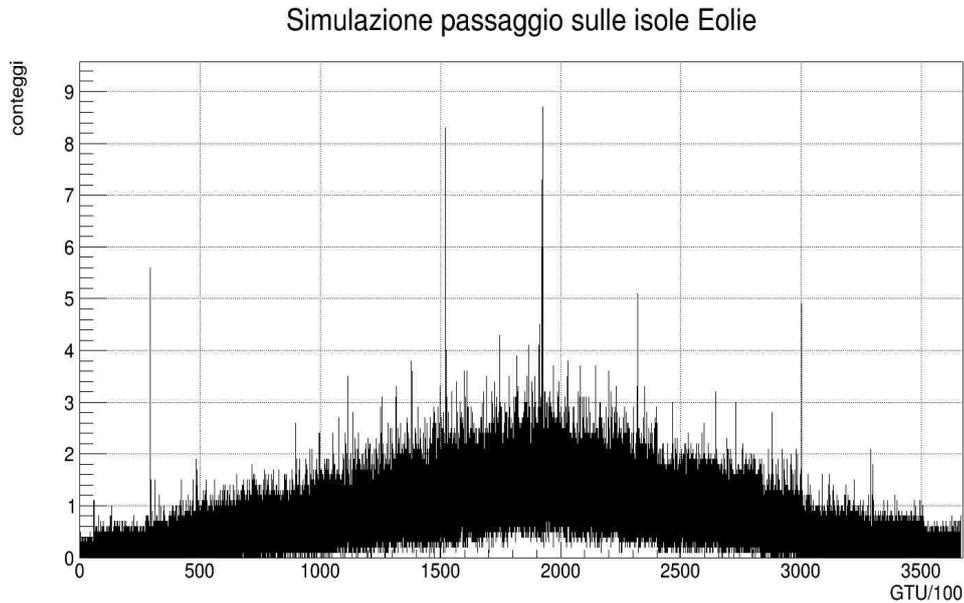


Figura 4.2: Grafico della riproduzione del passaggio su una fonte luminosa di vaste dimensioni, ottenuta nel prototipo. Il LED UV è alimentato con una tensione variabile da 3.178 V fino a circa 4.000 V e di nuovo fino a circa 3.200 V, il tempo di acquisizione è di 90 minuti.

sensibile fino alla terza cifra decimale), tramite acquisizione con un solo pixel. Questa riproduzione raffigura il passaggio sopra una qualsiasi sorgente luminosa estesa, ma è stata scelta un'isola dell'arcipelago delle Eolie in quanto la durata e l'intensità luminose sono confrontabili con dati satellitari esistenti riguardanti tali isole (a tale scopo è stato consultato il catalogo del DMSP - Defense Meteorological Satellite Program [54]). Si nota la presenza di picchi la cui intensità è poco elevata rispetto al fondo luminoso, che varia di un fattore 12 (tra circa 0.2 conteggi/GTU e circa 2.4 conteggi/GTU).

Entrambe queste misure sono state poi utilizzate, una volta riprodotti tramite estrapolazione a computer anche gli altri pixels del PMT, per effettuare simulazioni iniziali di eventi, descritte nel Capitolo 5.

Al fine di riprodurre tali pixels mancanti tramite programmi scritti in linguaggio C++, è stato effettuato uno studio sistematico dei pixels del PMT, verificando la risposta di ognuno di essi, con lo scopo di analizzarne l'efficienza, a

parità di condizioni di misura. Si è trovata così, per i pixels di bordo, un'efficienza inferiore rispetto a quelli centrali, com'è possibile vedere nella Figura 4.3, strutturata in modo tale da rendere graficamente comprensibile la mappa di efficienza dei pixels all'interno del PMT.

8.63	11.76	11.84	11.94	7.14
11.55	17.24	15.86	15.73	11.02
11.67	16.22	18.43	14.42	9.69
4.50	14.60	14.38	14.43	10.74
7.69	12.41	10.85	11.98	7.63

Figura 4.3: Efficienza dei pixels del PMT, a parità di condizioni sperimentali: tensione del LED UV mantenuta costante a 3.46 V, specchio smontato, luce diffusa tramite la configurazione con foglio bianco e durata delle misure pari a circa 30 secondi. I numeri nelle caselle sono espressi in conteggi/GTU.

Da ulteriori misure si è inoltre notato che il fascio prodotto dal LED era ben collimato sulla riga centrale (pixels 11, 12, 13, 14 e 15), lasciando le altre quasi senza rivelazione di segnale (caso non riportato in Figura 4.3), condizione in parte risolta utilizzando il foglio bianco curvato, in grado di creare diffusione luminosa e quindi un fondo ambientale più omogeneo.

## 4.2 Seconda campagna di misure

La seconda campagna di misure (Marzo 2013) ha visto il miglioramento del set-up sperimentale per l'acquisizione contemporanea di 23 pixels (dal 2 al 24, con il pixel 25 collegato ad un oscilloscopio di controllo, al fine di visualizzare istante per istante le variazioni di intensità luminosa viste dal PMT). Dopo una prima fase di studio della risposta dei pixels collegati (regolazione delle soglie per un'accumulazione dei dati pressochè uniforme), la tensione del LED UV è stata portata a 3.3 V, al fine di ottenere un fondo di circa 1 phe/pix/GTU, obiettivo della riproduzione del fondo ambientale. Con questa nuova configurazione sono state quindi ripetute le misure effettuate nella campagna precedente e tra i risultati più interessanti ottenuti vi sono stati: la riproduzione di una misura lunga di fondo cielo notturno, la riproduzione del passaggio su fonti luminose di grandi dimensioni (come le isole Eolie) e le prime riproduzioni di fulmini e raggi cosmici utilizzando lo stesso metodo delle fonti ampie (salita e discesa della tensione del LED o alternativamente della finestra di acquisizione).

Grazie inoltre all'analisi di misure di lunga durata, è stato possibile stimare che il sistema di acquisizione è in grado di registrare dati solo ogni 30 ms circa, indipendentemente dalla finestra di acquisizione scelta; tale tempo è stato quindi considerato come tempo morto tra elettronica e computer, come descritto nel ¶ 3.1.2.

La misura di fondo cielo (i cui grafici sono mostrati nella Figura 4.4) è stata effettuata a tensione costante; nonostante ciò si può notare (in particolar modo nel secondo grafico, raffigurante le medie) una decrescita nel segnale acquisito e ciò è dovuto al fisiologico assestamento al ribasso della tensione fornita al LED durante ore di acquisizione dati. A tal proposito, l'acquisizione di  $1.5 \cdot 10^6$  GTUs, con una GTU pari a 1 ms, avrebbe dovuto richiedere un tempo di acquisizione di circa 25 minuti; il tempo morto tra elettronica e computer ha però fatto in modo che la durata effettiva sia stata di circa 11 ore.

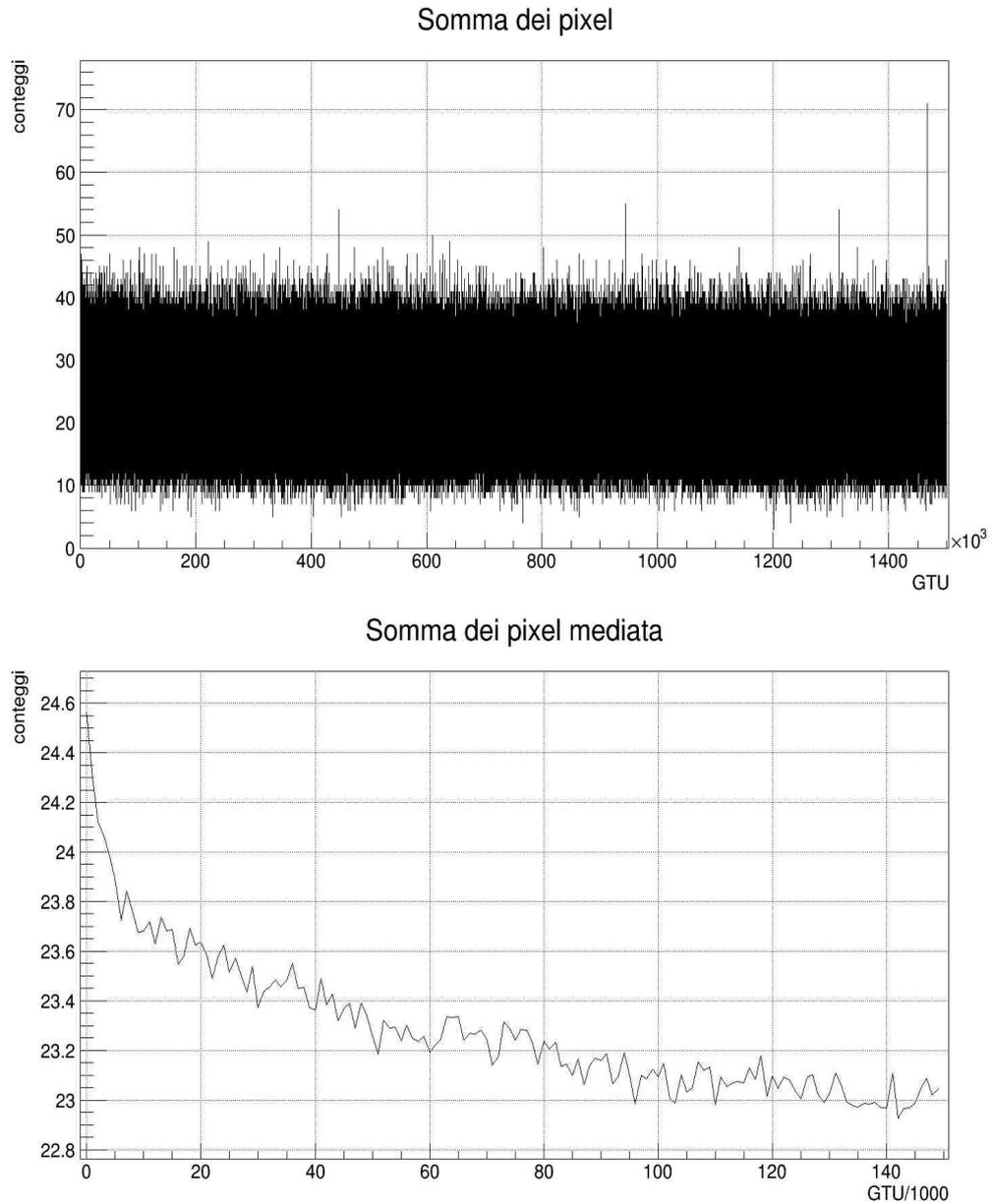


Figura 4.4: Grafici della riproduzione di fondo cielo, ottenuta nel prototipo. Il LED UV è alimentato con una tensione di 3.83 V, la finestra di acquisizione fissata a 1 ms ed il tempo di acquisizione è di  $1.5 \times 10^6$  GTUs. Entrambi i grafici raffigurano la somma dei 23 pixels in esame ed il secondo raffigura le medie ogni  $10^4$  GTUs in funzione del tempo.

Il passaggio sulle isole Eolie (i cui grafici sono mostrati nella Figura 4.5) è stato effettuato con tensione lentamente variabile; in realtà tale misura può essere utilizzata in modo più consono per il passaggio di una meteora nel campo

di vista del rivelatore, in quanto la durata complessiva, in rapporto alla velocità della Stazione Spaziale Internazionale, è di circa 0,5 secondi, pari ad un'estensione spaziale a terra della sorgente di circa 3-4 km.

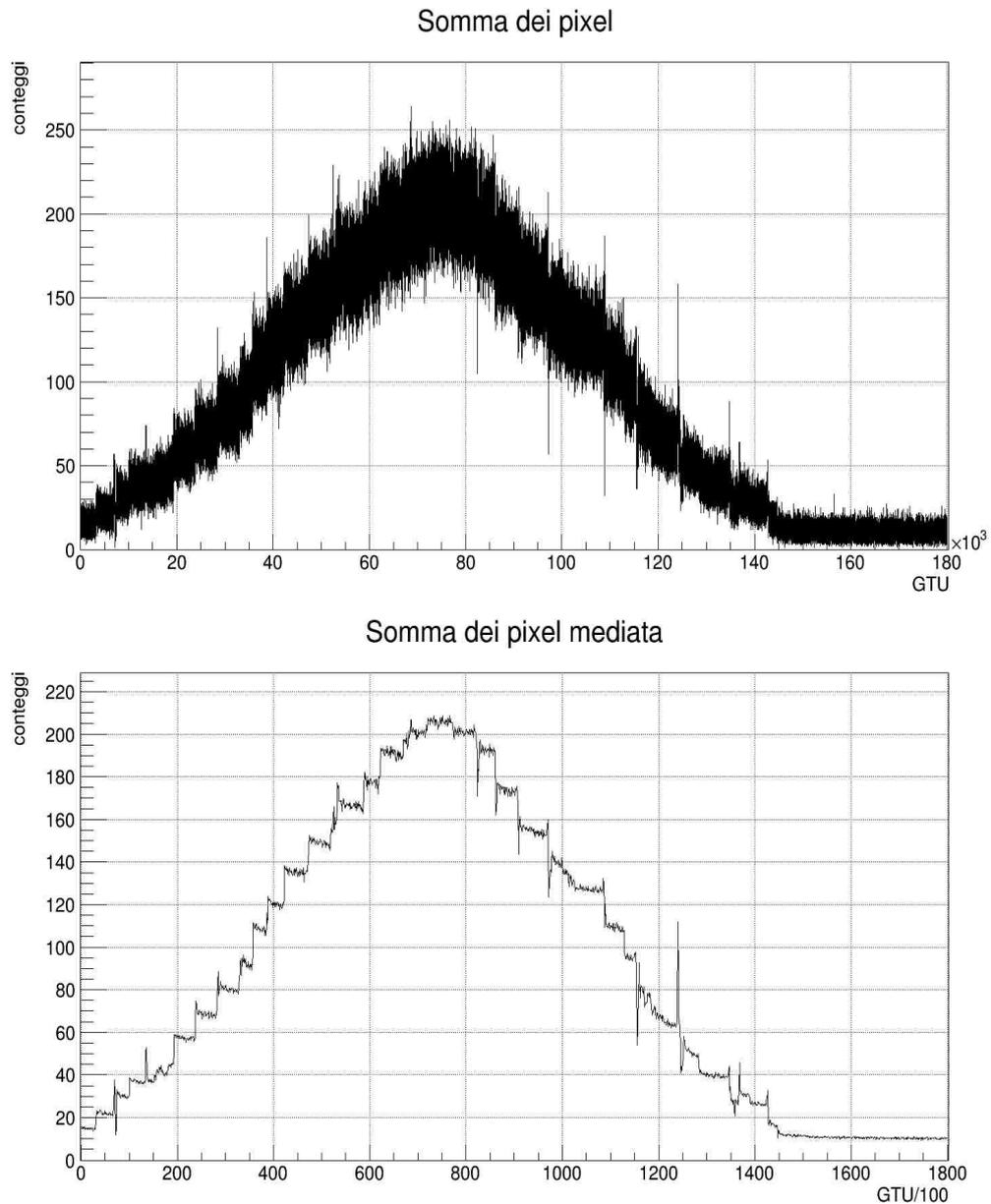


Figura 4.5: Grafici della riproduzione del passaggio su una fonte luminosa di vaste dimensioni, ottenuta nel prototipo. Il LED UV è alimentato con una tensione variabile da 3.2 V fino a circa 4.0 V e di nuovo fino a circa 3.2 V, il tempo di acquisizione è di 90 minuti. Entrambi i grafici raffigurano la somma dei 23 pixels in esame ed il secondo raffigura le medie ogni 100 GTUs in funzione del tempo, al fine di facilitare la comprensione visiva.

Oltre queste riproduzioni, di particolare rilevanza sono state le serie preliminari di misure per la riproduzione di eventi più veloci, quali fulmini e raggi cosmici, com'è possibile vedere nelle figure 4.6, 4.7 e 4.8

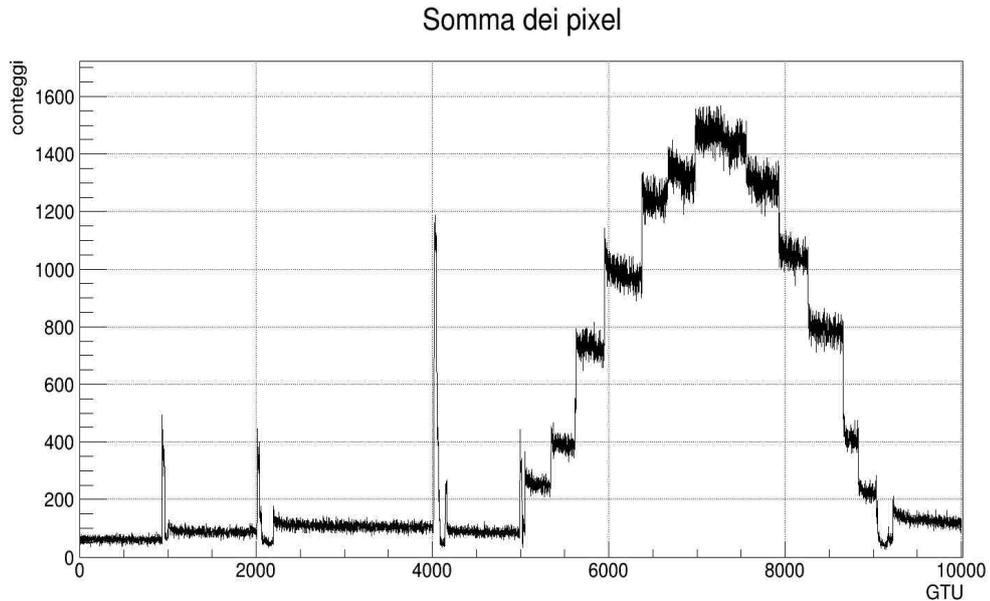


Figura 4.6: Grafico della riproduzione di raggi cosmici di diversa intensità e di un fulmine, ottenuta nel prototipo, tramite veloci variazioni della tensione di alimentazione del LED UV ed una finestra di acquisizione di 50 ms; il grafico raffigura la somma dei 23 pixels in esame.

Un ulteriore tentativo per migliorare la riproduzione dei raggi cosmici è stato quello di provare ad ottenere una striscia luminosa su dei pixels consecutivi tramite aggiustamenti della distanza e della velocità dello specchietto del prototipo, ma in tutte le configurazioni utilizzate la luce era pressochè contemporanea su tutti i pixels interessati, rendendo così impossibile ottenere dei risultati soddisfacenti con la configurazione in esame: il prototipo aveva raggiunto il massimo di resa possibile.

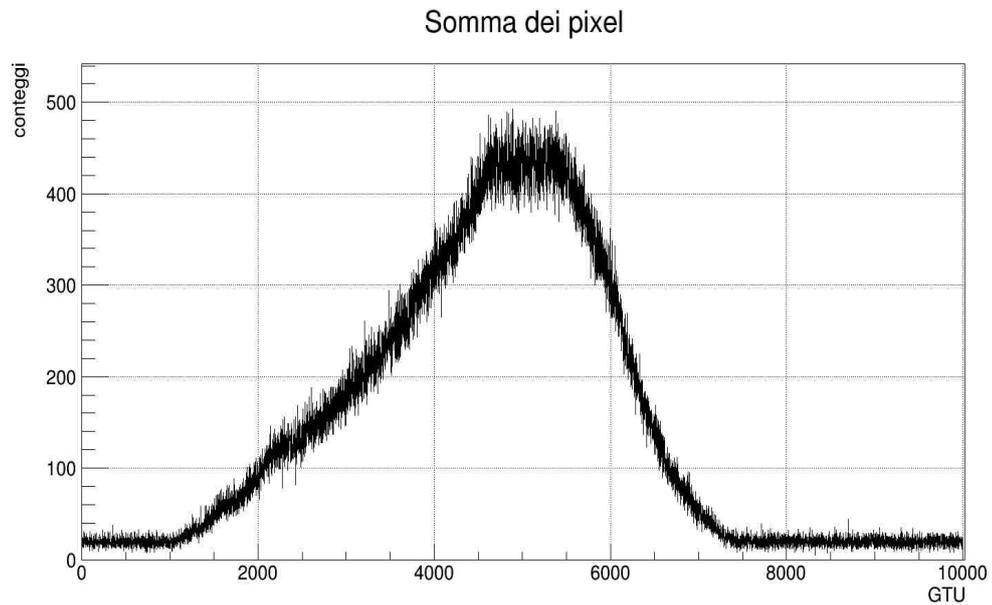


Figura 4.7: Grafico della riproduzione di un fulmine, ottenuta nel prototipo, a tensione costante, tramite variazioni della finestra di acquisizione da 5.5 ms fino a 125.0 ms e di nuovo a 5.5 ms; il grafico raffigura la somma dei 23 pixels in esame.

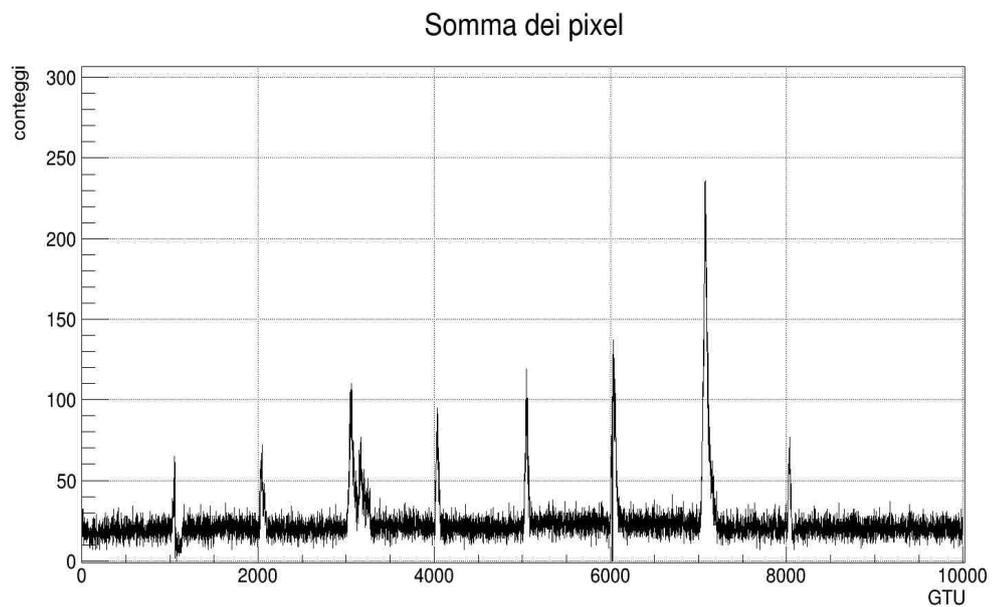


Figura 4.8: Grafico della riproduzione di raggi cosmici di diversa intensità, ottenuta nel prototipo, a tensione costante, tramite veloci variazioni della finestra di acquisizione; il grafico raffigura la somma dei 23 pixels in esame.

### 4.3 Terza campagna

Durante la terza campagna di misure (Luglio 2013), è stato effettuato il potenziamento del set-up sperimentale, abbandonando il prototipo e montando la scatola al cui interno è presente il PMT, sul soffitto sopra la vasca rotante. Per fare ciò, sono state costruite delle guide montate sul soffitto, in modo tale che la scatola potesse scorrere su esse, come si può vedere in Figura 4.9.



Figura 4.9: Fotografia delle fasi di montaggio delle guide sul soffitto sopra la vasca rotante.

I 25 pixels sono stati collegati, tramite cavi LEMO, ad un pannello metallico, appeso anch'esso al soffitto in corrispondenza delle guide. Ad esso sono stati collegati e raggruppati 25 cavi BNC (precedentemente tagliati, etichettati, sfilettati, saldati con i connettori, cablati e testati) di circa 25 metri, fissati alle pareti e collegati all'elettronica. Infine è stata allestita la vasca per le misure delle campagne successive.

Essendo stata dedicata principalmente alla costruzione del nuovo hardware e del nuovo set-up sperimentale, in tale campagna non sono state effettuate nuove misure.

#### 4.4 Quarta campagna di misure



Figura 4.10: Fotografia della vasca con l'allestimento della quarta campagna di misure.

Nella quarta campagna di misure (Settembre 2013), il set-up sperimentale, montato nella campagna precedente e visibile nella Figura 4.10, ha visto l'ulteriore miglioramento dell'acquisizione contemporanea con 24 pixels (dall'1 al 24, con il 25 utilizzato sempre come controllo collegato ad un oscilloscopio) e il montaggio del cannoncino col LED UV, presente nel prototipo, sulla passerella della vasca, rivolto verso l'alto, sotto il fototubo.

Dopo una prima serie di prove di funzionamento del nuovo apparato e di aggiustamenti del caso (copertura di luci esterne, centramento del cannoncino col fototubo, test della tensione del LED UV), è stata effettuata una serie di misure a vasca ferma, al fine di valutare il solo fondo ambientale. Il fondo luminoso ambientale, ovvero la brillantezza intrinseca del cielo notturno, che il rivelatore di fluorescenza del progetto JEM-EUSO vedrebbe dalla Stazione Spaziale Internazionale è stato riprodotto artificialmente in laboratorio creando una fonte luminosa continua nell'intervallo di lunghezza d'onda dello spettro visibile (400-700 nm). A

tale scopo è stato utilizzato lo schermo del computer (su cui è presente il programma di gestione della rotazione), posto ai lati della vasca, realizzando e proiettando su esso sfondi colorati di intensità e frequenze differenti, al fine di studiare la risposta del PMT (corredato di un filtro passabanda in grado di tagliare le lunghezze d'onda esterne all'intervallo tra 300 e 400 nm). Inoltre è stato misurato, sempre a vasca ferma, l'incremento di luminosità ambientale tramite la proiezione di uno sfondo di intensità crescente di un fattore 7 (mostrato nella Figura 4.11).

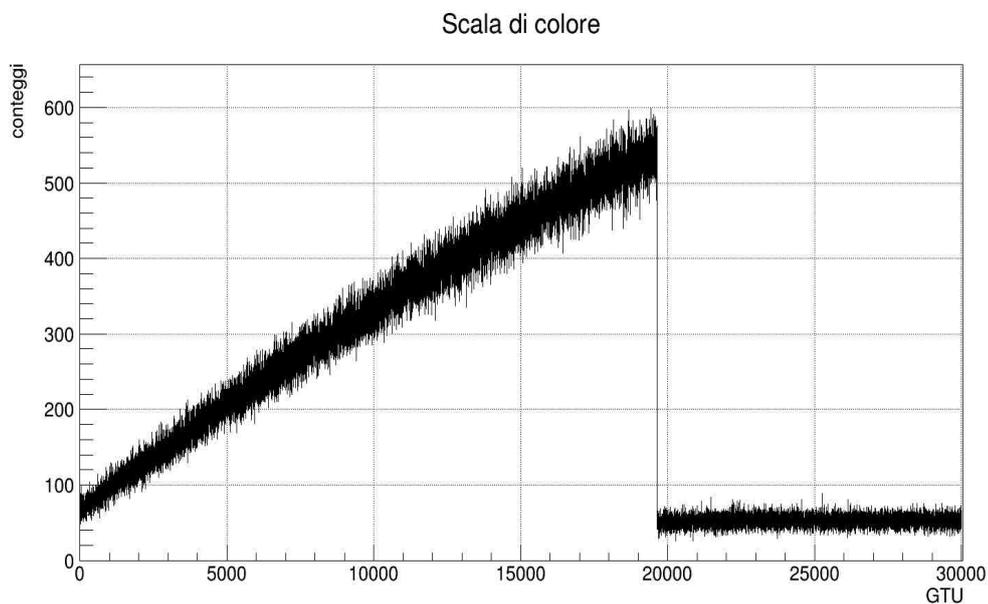


Figura 4.11: Grafico della riproduzione di un fondo luminoso crescente, ottenuta tramite la proiezione di uno sfondo di intensità in aumento, la vasca ferma ed il LED UV spento. Il grafico raffigura la somma dei 24 pixels in esame.

Nel seguito sono state effettuate diverse prove con la vasca in rotazione. Uno dei risultati più interessanti è mostrato nella Figura 4.12, in cui è raffigurata la rotazione della vasca in assenza di sorgenti ma con evidenza di parti riflettenti della struttura non identificate preliminarmente (nello specifico i due lati della passerella e la struttura in legno chiaro ospitante i motori che generano vento) e poi oscurate coprendole con stoffa nera. Nell'ingrandimento della figura i picchi corrispondono rispettivamente: al lato della passerella su cui è montato il LED (passerella 1 - GTU 4500), al lato opposto (passerella 2 - GTU 5500) ed alla

struttura in legno chiaro (GTUs 6500-7000).

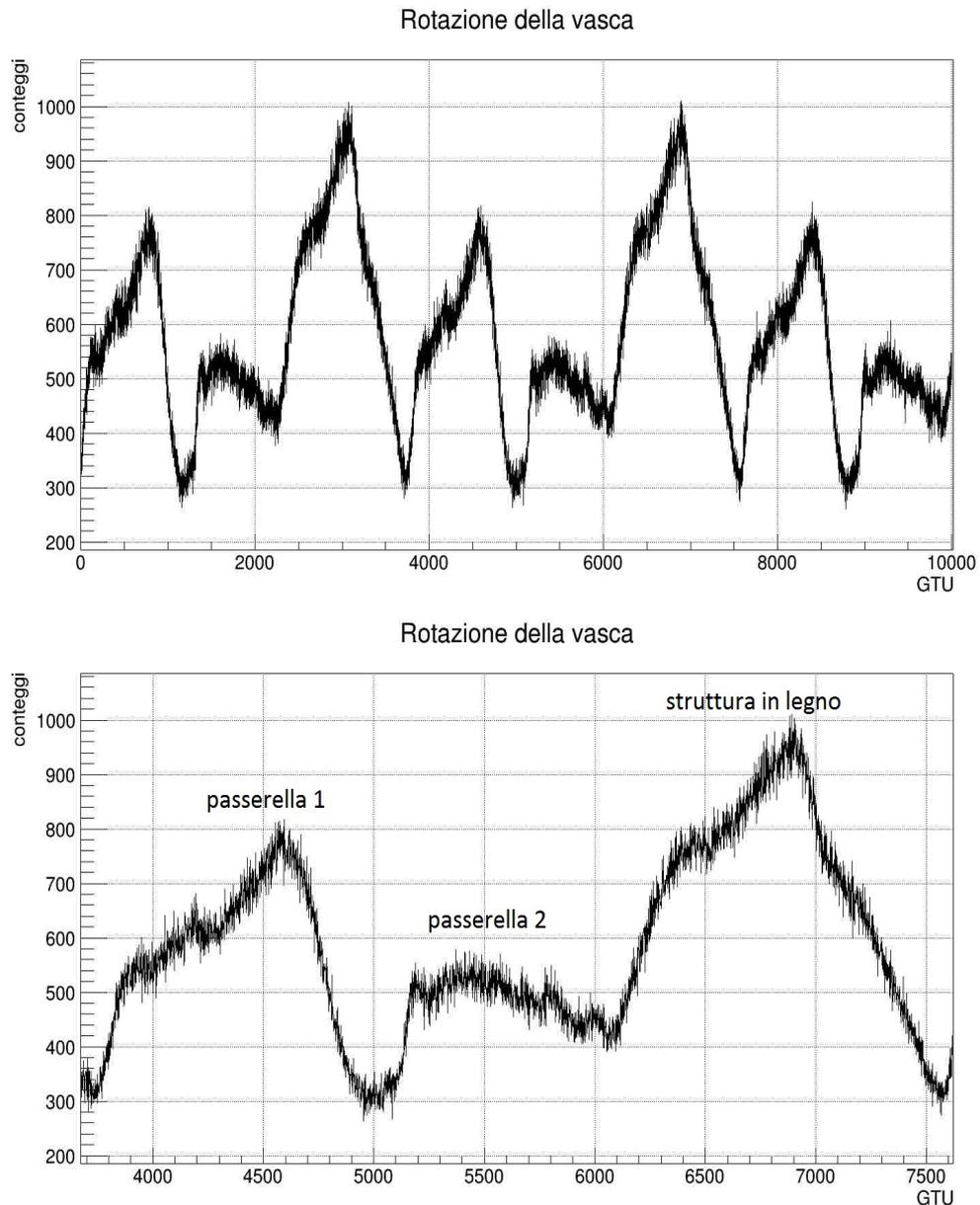


Figura 4.12: Grafici della rotazione della vasca, ottenuti con lo schermo riprodotto un fondo luminoso di lunghezza d'onda di  $565 \div 590 \text{ nm}$  (colore giallo), velocità di 1 giro ogni 2 minuti e LED UV spento. Sono evidenti le differenze di luminosità rivelate dal PMT in corrispondenza di zone scure (fondo vasca) e chiare (riflettenti lo schermo). I grafici raffigurano la somma dei 24 pixels in esame (il primo raffigura la misura intera, mentre il secondo l'ingrandimento di un giro).

Le prove successive sono state effettuate con il LED UV acceso, modificando di volta in volta la velocità di rotazione della vasca, al fine di riprodurre eventi di diversa natura. Due dei risultati ottenuti sono riportati nella Figura 4.13, in cui sono state utilizzate due diverse velocità di rotazione della vasca (la minima e la massima consentite).

Dai grafici suddetti è chiaro che, a parità di sorgente montata sulla vasca, con rotazioni di quest'ultima di diversa velocità, è possibile riprodurre eventi di diversa natura, passando ad esempio da una meteora passata di striscio o su un solo PMT (in caso di rotazione lenta) ad un raggio cosmico (in caso di rotazione veloce). Si nota però che la fonte luminosa non genera un singolo picco, bensì due o tre picchi consecuzionali; le ragioni di questo comportamento, seppur poco chiare, possono essere ricercate nel non perfetto allineamento tra il cannoncino col LED e il fototubo o nelle possibili riflessioni della parte interna di quest'ultimo, nero ma lucido.

Infine, sia nei grafici presentati che, in particolar modo, in quelli relativi ai singoli pixels (alcuni dei quali sono riportati in Figura 4.14), si sono notati degli avvallamenti spesso marcati dove dovrebbe presentarsi invece il culmine del picco: l'ipotesi per la spiegazione di ciò è stata ricercata nel fatto che il PMT (o il pixel in questione) non sia riuscito a “contare” l'intero ammontare di intensità luminosa pervenutagli e quindi si sia trovato in condizione di pileup<sup>1</sup>, portando l'intensità del segnale fino a zero proprio nel momento del picco, problema che da quel momento si è cercato di risolvere evitando saturazioni di segnale con eventi troppo luminosi.

---

<sup>1</sup>Il fenomeno denominato pileup, in fisica delle particelle, avviene quando un rivelatore di particelle viene colpito da più eventi allo stesso tempo; si raggiunge così una saturazione di segnale e si hanno delle intensità luminose troppo elevate, portando ad una involuzione della risposta dello strumento.

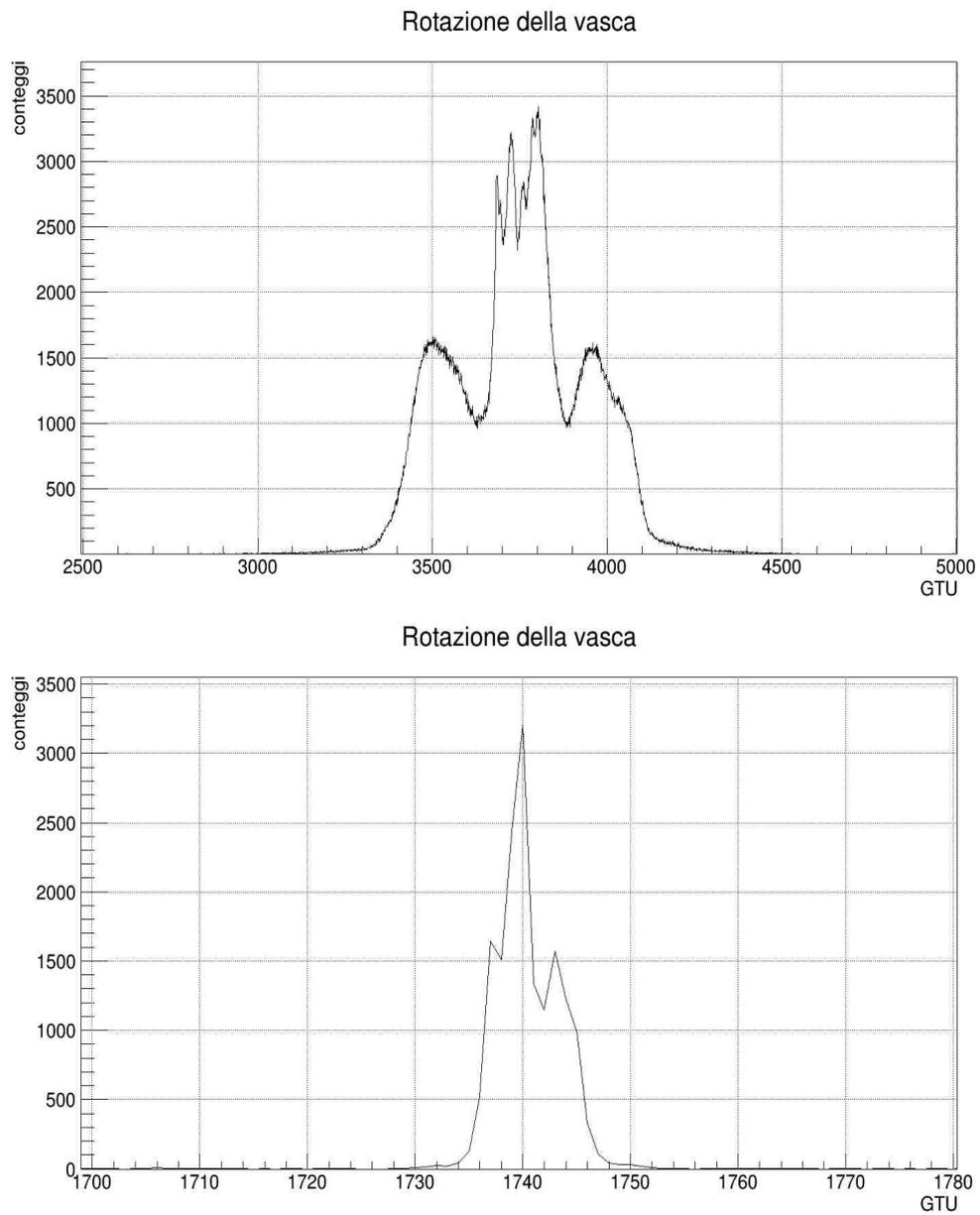


Figura 4.13: Grafici della rotazione della vasca, ottenuti con lo schermo spento e LED UV alimentato con una tensione di 4.0 V; i grafici raffigurano la somma dei 24 pixels in esame. Nel primo grafico la velocità di rotazione della vasca è di  $10^{-2} m/s$ ; nel secondo è di  $1 m/s$ .

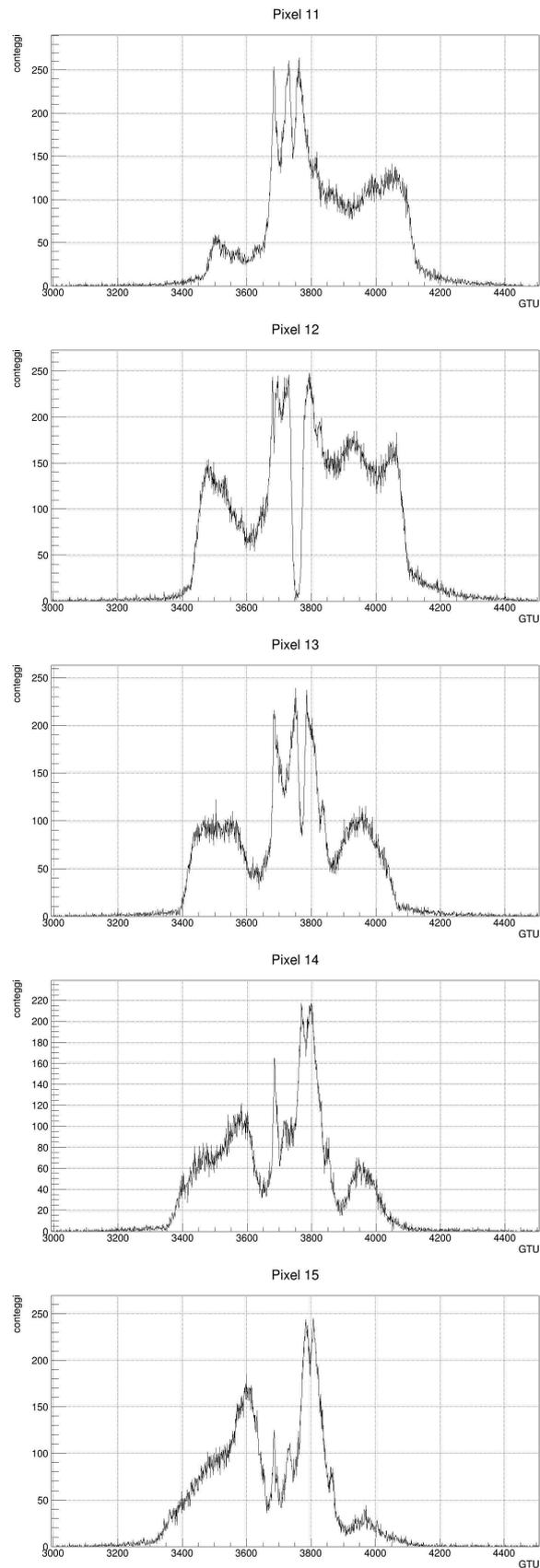


Figura 4.14: Grafici della rotazione della vasca, ottenuti con lo schermo spento, LED UV alimentato con una tensione di 4.0 V e la velocità di rotazione della vasca è di  $10^{-2} m/s$ ; i grafici raffigurano i pixels 11, 12, 13, 14 e 15.

## 4.5 Quinta campagna di misure

Nella quinta campagna di misure (Ottobre 2013) sono stati effettuati dei test su nuove sorgenti luminose, costruite tramite nuovi LEDs e nuovi cannoncini (corredati di tappi forati con aperture differenti), in modo da poter variare l'ampiezza del fascio generato dal LED.



Figura 4.15: Fotografia dei cannoncini, corredati di tappi forati con aperture differenti, per la riproduzione di eventi luminosi concentrati.

La nuova strumentazione, visibile in Figura 4.15, è stata realizzata in collaborazione con l'officina meccanica dell'INFN presso l'Università degli Studi di Catania, dopo la conclusione della campagna precedente, in quanto si è ritenuto opportuno ampliare il numero di strumenti in grado di produrre eventi di dimensioni ed intensità diverse. A tal fine sono stati costruiti tre "tappi" forati con aperture di diametri 0.35, 0.45 e 0.60 mm.

Dai grafici relativi alle misure con tali aperture (mostrati nella Figura 4.16) si evince il peggioramento dei picchi con l'aumentare dell'apertura, sia per quanto riguarda la comparsa di picchi secondari dovuti a riflessioni, sia per la maggior presenza di pile-up con l'aumentare dell'intensità luminosa in arrivo sul PMT.

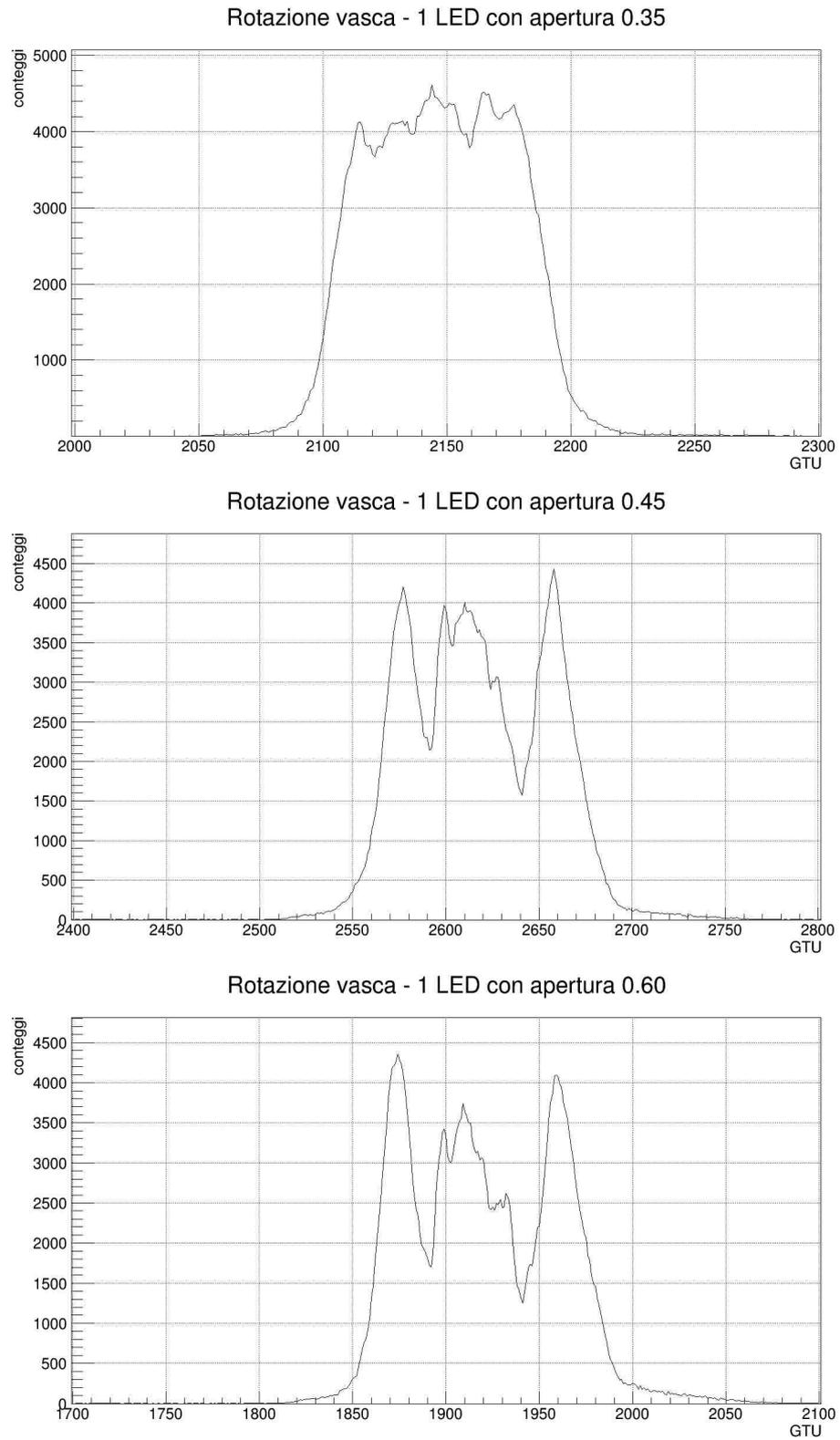


Figura 4.16: Grafici della rotazione della vasca, ottenuti con lo schermo spento, velocità di  $10^{-1} m/s$  e LED UV alimentato con una tensione di 4.0 V; i grafici raffigurano la somma dei 24 pixels in esame e sono gli ingrandimenti delle zone di interesse. I tre grafici si differenziano per le aperture dei tappi forati usate, rispettivamente di 0.35, 0.45 e 0.60 mm.



Figura 4.17: Fotografia del dettaglio della scatola con il fototubo e del cannoncino col LED UV dopo l'avvicinamento.

Inoltre il cilindro della scatola contenente il PMT è stato allungato grazie all'aggiunta di un ulteriore cilindro nero, in modo tale da subire meno dispersione di luce ed il cannoncino col LED UV è stato montato su un supporto, avvicinandolo così al fototubo, com'è possibile vedere nella Figura 4.17. Per risolvere il problema del pile-up, mostratosi nella campagna precedente e preponderante anche in quella in esame, sono state apportate varie modifiche alle soglie ed è stato studiato a fondo l'apparato dal punto di vista geometrico per minimizzare il problema. Migliorata tale problematica, essendo i picchi troppo luminosi rispetto al fondo (situazione non confrontabile con gli eventi da riprodurre), il passo successivo è stato quello di lavorare sulla tensione di alimentazione e sull'uso di filtri per l'at-

tenuazione del segnale. Dopo aver apportato le modifiche strutturali suddette, è stata scelta una configurazione ottimale per minimizzare dette problematiche (il grafico della misura effettuata in tali condizioni è raffigurato in Figura 4.18).

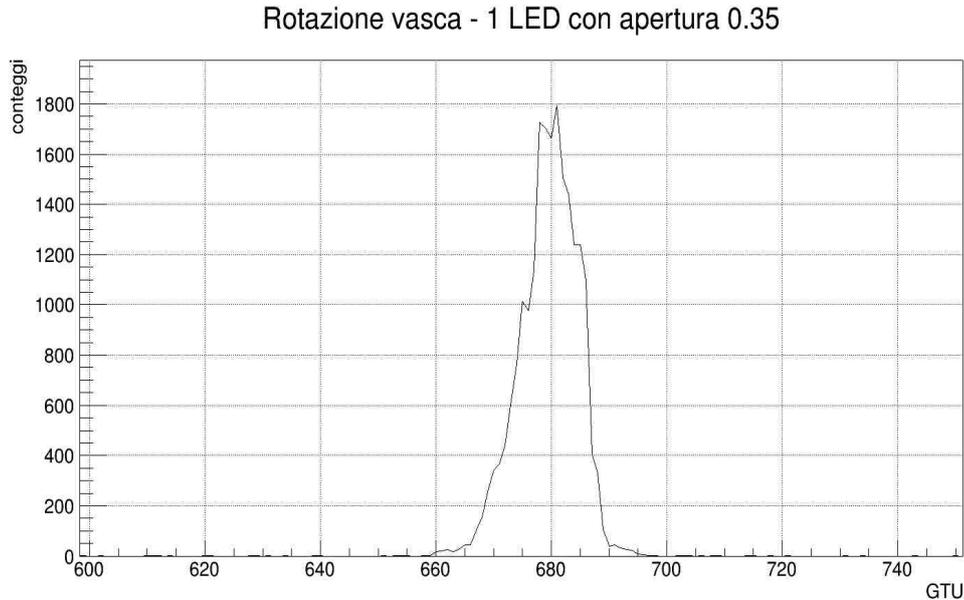


Figura 4.18: Grafico della rotazione della vasca, ottenuto con lo schermo spento, velocità di  $10^{-1} m/s$ , LED UV alimentato con una tensione di 3.2 Volt e presenza di un filtro attenuante; il grafico raffigura la somma dei 24 pixels in esame ed è l'ingrandimento della zona di interesse.

Con la nuova configurazione sono state modificate nuovamente le soglie dei pixels per ottenere misure sempre più omogenee e quindi sono stati ripetuti i test con luminosità crescente, trovando la configurazione ideale per tale aumento, in modo da riprodurre il passaggio del segnale di fondo cielo da una condizione di assenza di luna ad una condizione di luna piena. Inoltre sono state effettuate misure con vasca in rotazione, in diverse condizioni di riflessioni di luce, migliorando di volta in volta il set-up sperimentale stesso (inclusa la modifica della struttura in legno dipingendola di nero, portando così l'intera struttura nelle condizioni ideali, visibili nella Figura 3.6 del ¶ 3.1.3). Il passo successivo è stato quello di studiare la migliore configurazione per aggiungere una seconda fonte luminosa nella stessa rotazione della vasca, tramite un secondo LED (rosso) all'interno di un cilindro (di

larghe dimensioni, per simulare una fonte più ampia, come mostrato nella Figura 3.10), al fine di creare due eventi separati nell'arco della stessa misura, ottenendo peraltro ottimi risultati (il grafico è raffigurato in Figura 4.19).

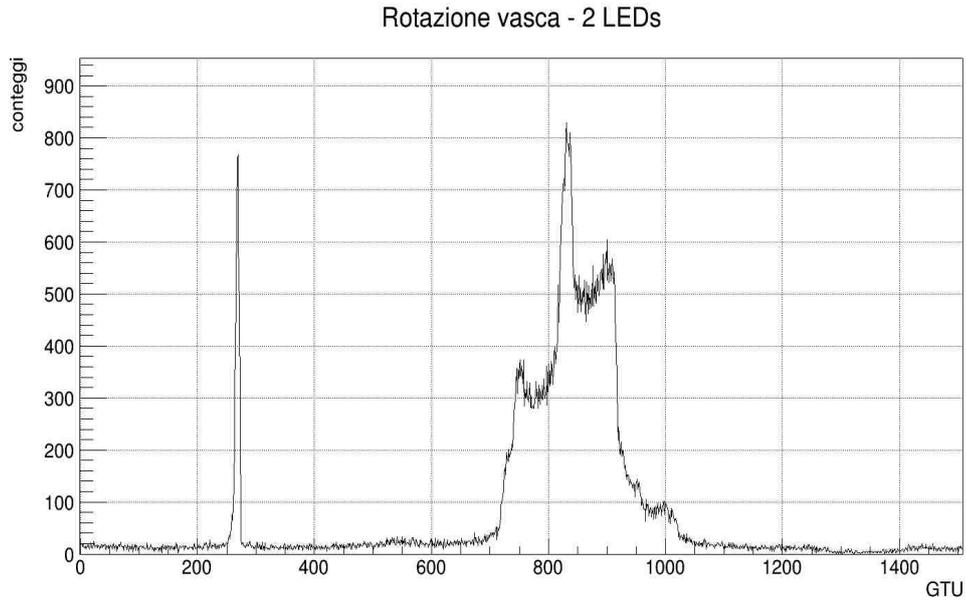


Figura 4.19: Grafico della rotazione della vasca, ottenuto con lo schermo riprodotto un fondo luminoso di lunghezza d'onda di  $630 \div 760 \text{ nm}$  (colore rosso), velocità di  $10^{-1} \text{ m/s}$ , LED UV alimentato con una tensione di 3.14 V e presenza di un filtro attenuante e LED rosso alimentato con una tensione di 1.8 V; il grafico raffigura la somma dei 24 pixels in esame ed è l'ingrandimento della zona di interesse.

## 4.6 Sesta campagna di misure

La sesta campagna di misure (Novembre 2013) è stata dedicata all'allestimento di ulteriori sorgenti luminose nella vasca, al fine di ottenere più eventi nell'arco della stessa rotazione. Ripartendo quindi dalla campagna precedente, sono state perfezionate le ultime condizioni, in cui venivano riprodotti di seguito un evento veloce e concentrato come un raggio cosmico ed uno lento ed ampio come una città, tramite due LEDs diversi con collimatori differenti. Sono inoltre state modificate le condizioni di acquisizione agendo sull'elettronica, in modo da porsi in condizioni di compatibilità con quelle di JEM-EUSO ( $GTU = 40 \mu s$ , onda quadra di 400 ns, come descritto nel ¶ 3.1.2); in tali condizioni è stata modificata anche la luminosità di fondo ambientale, al fine di tornare all'obiettivo di luminosità prefissato (1 phe/pixel/GTU); il grafico della misura più significativa in queste condizioni è raffigurato in Figura 4.20).

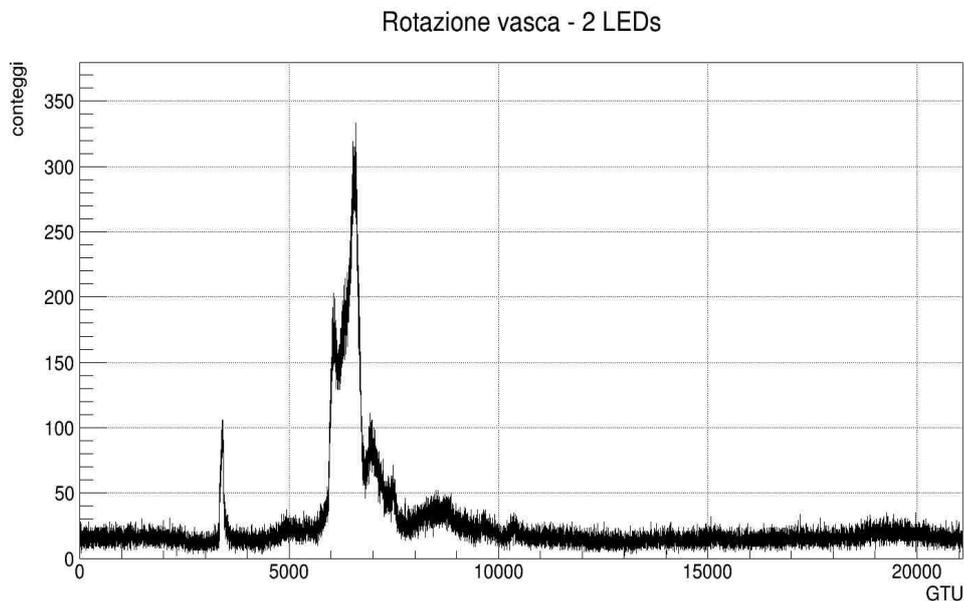


Figura 4.20: Grafico della rotazione della vasca, ottenuto con lo schermo riprodotto il fondo cielo fisso, velocità di  $10^{-2} m/s$ , LED UV alimentato con una tensione di 3.30 V e LED rosso alimentato con una tensione di 2.07 V; il grafico raffigura la somma dei 24 pixels in esame ed è l'ingrandimento di una sola rotazione.

Sono poi state aggiunte altre sorgenti: un secondo LED blu di lunghezza d'onda pari a 470 nm (denominato LED blu), alimentato con la stessa tensione del LED UV, in un cannoncino per riprodurre un nuovo evento veloce di piccole dimensioni; un LED di luce bianca alimentato da tensione pulsata per riprodurre dei fulmini (il cui sistema è raffigurato nella Figura 4.21) ed uno dei pannelli di legno chiaro per riprodurre una condizione di luminosità ambientale differente, quale una nuvola (il grafico è raffigurato in Figura 4.22).

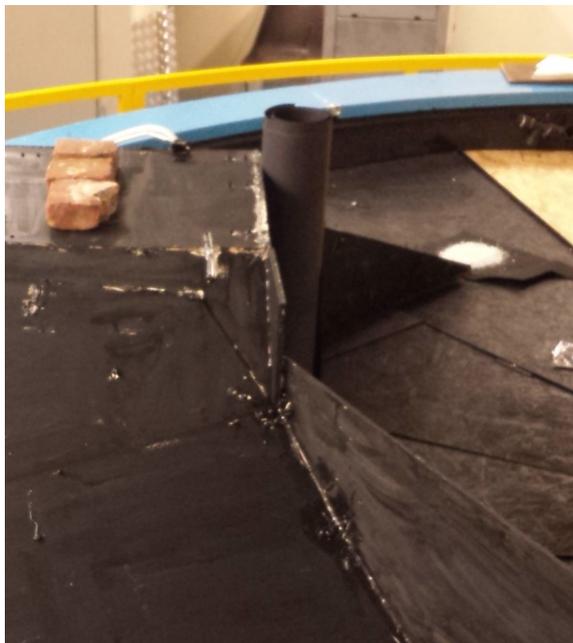


Figura 4.21: Fotografia del sistema tramite cui è stata riprodotta la tempesta di fulmini.

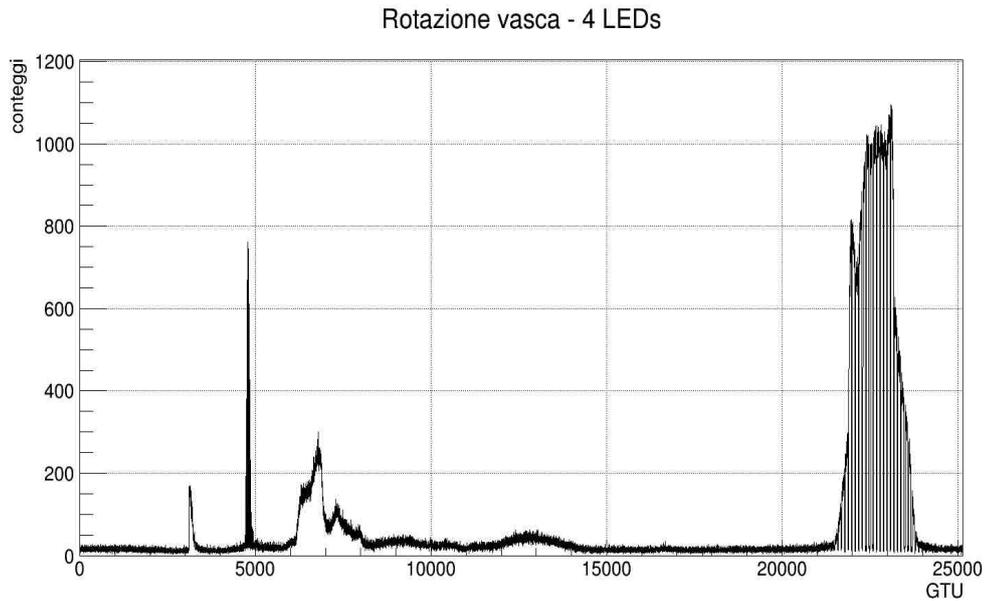


Figura 4.22: Grafico della rotazione della vasca, ottenuto con lo schermo riprodotto il fondo cielo fisso, velocità di  $10^{-2} m/s$  e presenza di quattro LEDs, alimentati con tensioni diverse e posizionati con collimazioni differenti; il grafico raffigura la somma dei 24 pixels in esame ed è l'ingrandimento di una sola rotazione.

Un'ulteriore prova è stata effettuata unendo alla rotazione lenta della vasca con tutte le sorgenti luminose, un fondo ambientale crescente (ottenuto tramite lo schermo riprodotto il fondo cielo, da cui veniva proiettato uno sfondo di intensità in aumento), come riportato nel grafico in Figura 4.23.

Il passo successivo nell'avvicinarsi alle condizioni di JEM-EUSO è stato quello di montare nella parte più bassa del fototubo una lente collimatrice (visibile nella Figura 4.24) e ripetere nuovamente i cicli di misure con condizioni identiche alle precedenti, ma con la nuova configurazione, ottenendo in tal modo risultati differenti, in quanto le sorgenti venivano focalizzate sul PMT in modo diverso (vedasi Figura 4.25)

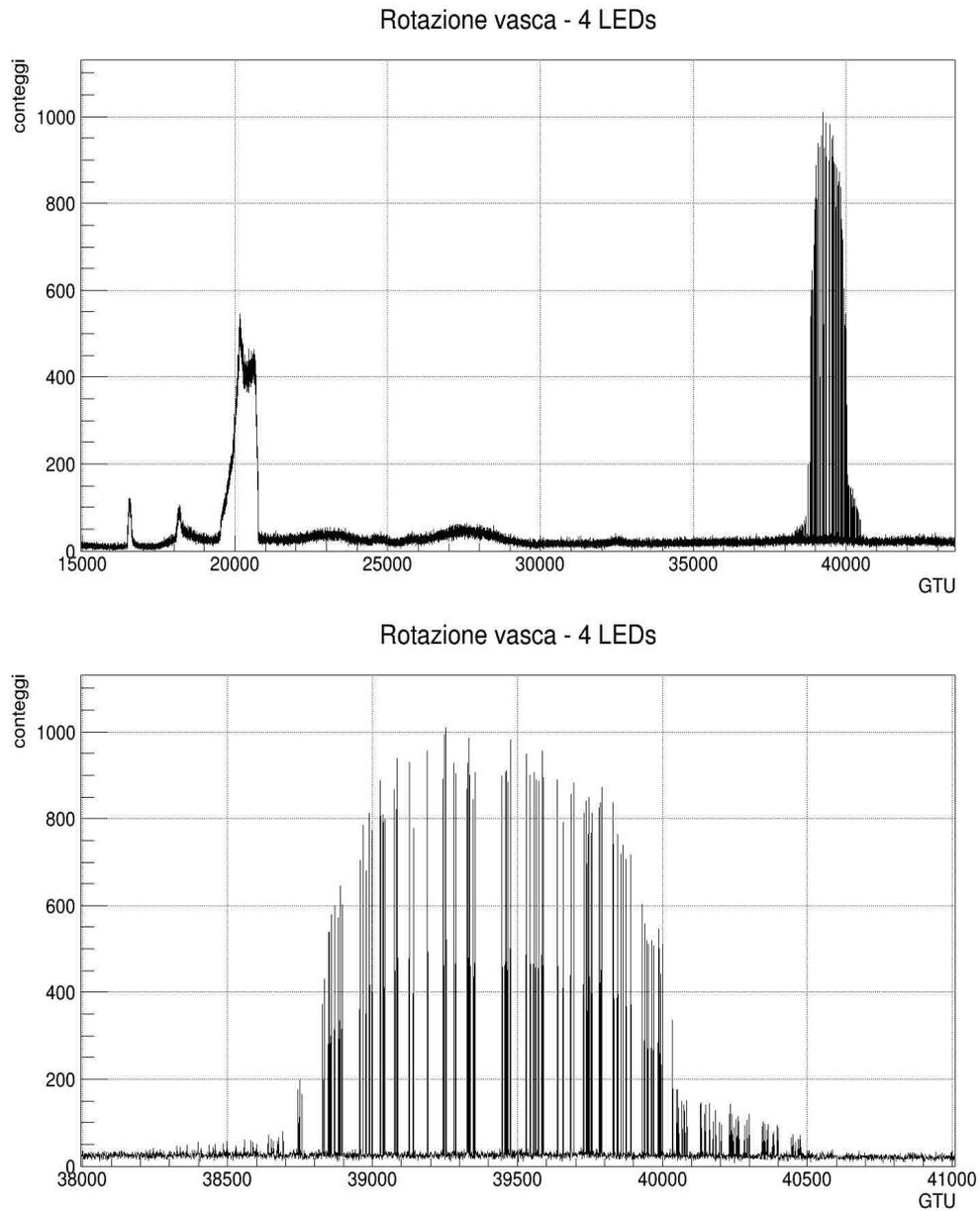


Figura 4.23: Grafici della rotazione della vasca, ottenuti con lo schermo riprodotto il fondo cielo a intensità e lunghezza d'onda crescenti, velocità di  $10^{-2} m/s$  e presenza di quattro LEDs, alimentati con tensioni diverse e posizionati con collimazioni differenti. I grafici raffigurano la somma dei 24 pixels in esame; il primo è l'ingrandimento di una sola rotazione, mentre il secondo è un ulteriore ingrandimento, in cui si vede la riproduzione di una tempesta di fulmini, prodotta tramite il LED di luce bianca alimentato da impulsatore.



Figura 4.24: Fotografia della lente collimatrice montata alla base del fototubo e dettaglio della lente.

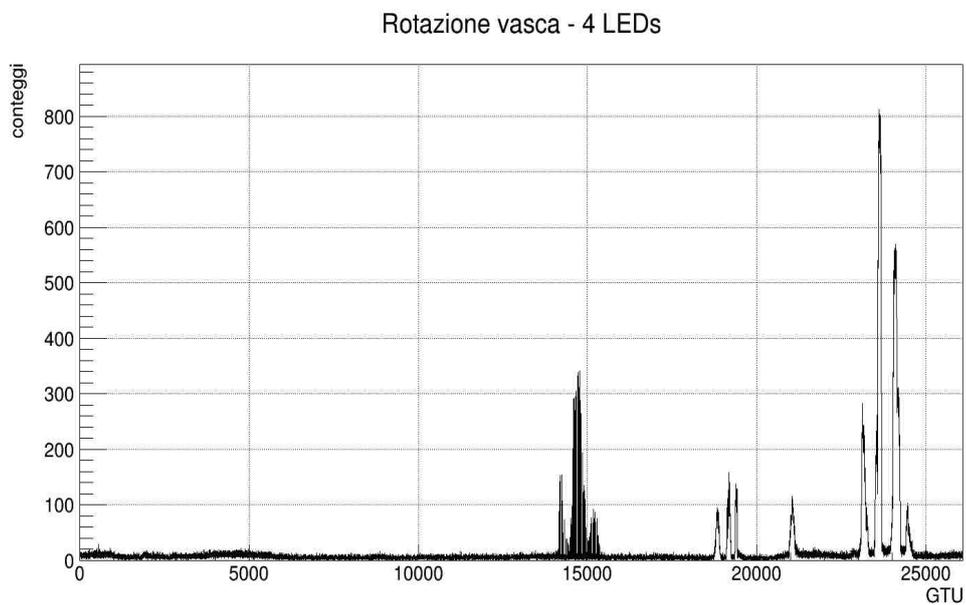


Figura 4.25: Grafico della rotazione della vasca, ottenuto con lo schermo riprodotto il fondo cielo fisso, velocità di  $10^{-2} m/s$  e presenza di quattro LEDs, alimentati con tensioni diverse e posizionati con collimazioni differenti; il grafico raffigura la somma dei 24 pixels in esame ed è l'ingrandimento di una sola rotazione.

## 4.7 Settima campagna di misure

Avendo raggiunto dei buoni risultati con varie sorgenti di diverse intensità e dimensioni, la settima campagna di misure (Dicembre 2013) è stata dedicata allo studio della risposta del PMT in diverse condizioni di luce riflessa dall'acqua, sia quella con cui è stata riempita la vasca, sia quella presente in alcune vaschette appositamente sistemate sotto il PMT. In regime di vasca ferma, sono stati attivati i motori in grado di generare vento, montati i pannelli in legno al fine di evitare dispersioni del vento e sono stati effettuati dei cicli di misure in assenza ed in presenza di onde (con diverse velocità del vento) e con diversi fondi ambientali più o meno luminosi.

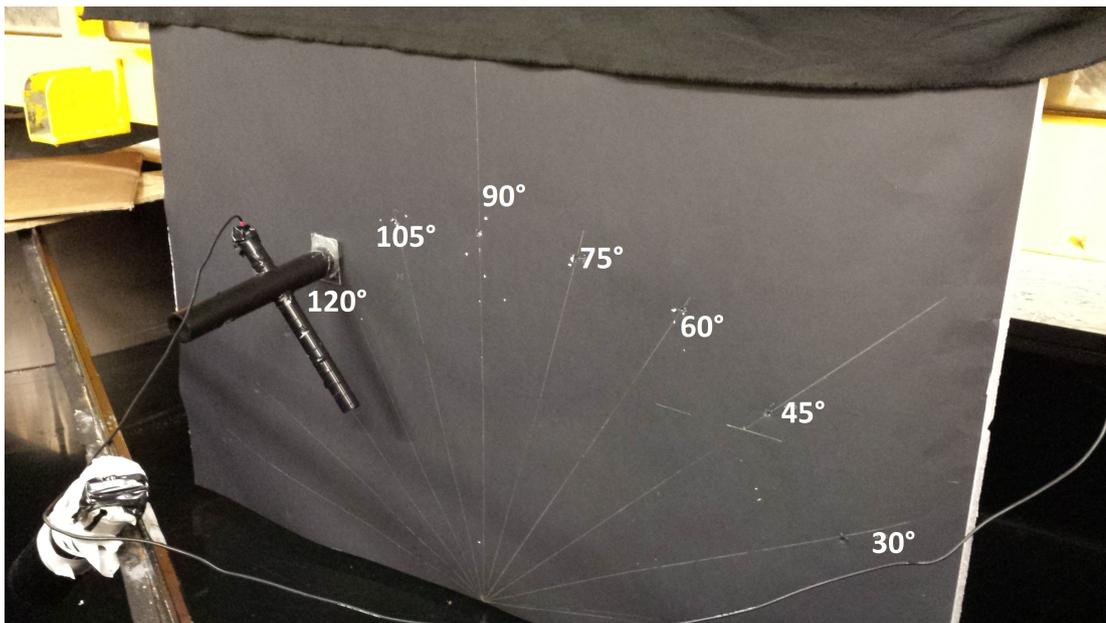


Figura 4.26: Fotografia del sistema utilizzato per studiare le componenti di luce incidenti sull'acqua.

Al fine di studiare le componenti riflessa e trasmessa della luce in acqua, è stato effettuato un ciclo di misure con un fascio concentrato di luce incidente sulla superficie dell'acqua a diverse angolazioni, tramite un set-up costruito grazie ad un cannoncino con un LED, montato su un pannello, ed il cui fascio era regolabile in angolazione rispetto alla superficie dell'acqua presente nella vasca (il sistema è

visibile nella Figura 4.26). Come si può vedere nella tabella riassuntiva 4.1, con l'aumentare dell'angolazione, in un primo momento sembra vi sia un aumento di intensità luminosa riflessa dall'acqua, ma già a  $60^\circ$  si notano delle incongruenze, che diventano palesi una volta superata la soglia dei  $90^\circ$ , oltre la quale la media dovrebbe decrescere ed invece aumenta in modo significativo. Si è concluso che il set-up sperimentale non era controllabile al punto da ottenere un insieme di risultati significativamente rilevanti. La motivazione è stata ricercata nel fatto che probabilmente la luce riflessa non proviene esclusivamente dalla superficie dell'acqua ma anche dal fondo della vasca (nero ma a sua volta riflettente). L'insieme di queste problematiche ha fatto capire che questa strada non è quella più adatta per studiare le riflessioni e, di conseguenza, l'albedo come effetto Cherenkov e ha indotto a ideare nuovi metodi, tra cui lo studio delle onde, effettuato nella nona e nell'undicesima campagne di misure.

Angolo	Media
$15^\circ$	0.442
$30^\circ$	0.896
$45^\circ$	1.518
$60^\circ$	0.712
$75^\circ$	2.603
$90^\circ$	1.974
$105^\circ$	3.254
$120^\circ$	7.299

Tabella 4.1: Tabella riassuntiva delle misure effettuate a diversi angoli e la corrispondente media, in conteggi/GTU, dei risultati ottenuti dalla somma di tutti i pixels del PMT.

Inoltre sono state effettuate molte misure con vaschette riempite d'acqua, illuminate e posizionate sulla passerella sotto il PMT, per studiare la differenza di comportamento in caso di acqua semplice e di acqua con diverse condizioni di stratificazione di sale (stratificazione semplice, con aggiunta di particelle, con aggiunta di inchiostro e presenza di detersivo; una di tali condizioni è raffigurata nella Figura 3.9). Dall'analisi di queste misure ci si è resi conto che le condizioni di misura erano tante e poco controllabili (posizione della sorgente luminosa che

illumina le vaschette, intensità della sorgente luminosa, condizioni di stratificazione più o meno lasciate a riposo), per cui lo studio non può essere considerato concluso. È tuttavia necessaria un'analisi dettagliata in presenza di condizioni più stabili, data l'interessante prospettiva di riprodurre in tal modo effetti come ghiacciai, nebbia, nuvole ed altre condizioni atmosferiche.

## 4.8 Ottava campagna di misure

Nell'ottava campagna di misure (Gennaio 2014) sono proseguite le prove effettuate nella campagna precedente per verificare la risposta del PMT sotto diverse condizioni di luce riflessa dall'acqua. Sono state eseguite misure con una vaschetta in cui è stata riprodotta una condizione di nuvole localizzate, tramite stratificazione di sale, variando volume d'acqua, quantità di particelle in sospensione utilizzate e condizioni di luminosità, senza ottenere però risultati soddisfacenti. Sono stati poi effettuati i primi test relativi all'uso di nuovi strumenti, quali l'oscilloscopio e la piattaforma Arduino (descritti nel ¶ 3.1.3), per riprodurre eventi di breve durata sia in condizioni di vasca ferma che in movimento, eseguendo uno studio sistematico di entrambi i sistemi.

Sono state eseguite alcune delle misure più significative dell'intero lavoro, com'è possibile vedere nelle figure 4.27 e 4.28, rappresentanti la stessa condizione, ma rispettivamente con un segnale di fondo generato da un LED (posizionato sul pannello metallico sospeso al soffitto, visibile in alto a sinistra nella Figura 4.10) e con quello generato dal computer, utilizzando le seguenti sorgenti e materiali (indicando per ciascuna la GTU corrispondente alla rivelazione da parte del PMT):

- vaschetta con soluzione salina per la riproduzione delle nuvole - GTU 4500;
- sostegno interno di collegamento con il perno centrale - GTU 6000;
- muschio - GTU 7500;
- piattaforma Arduino - GTU 10000;
- specchio con polistirolo - GTU 11000;
- mattoni - GTU 14000;
- polvere di vetro - GTU 16000;
- sabbia - GTU 17500;

- figure di Lissajous - GTU 19000.

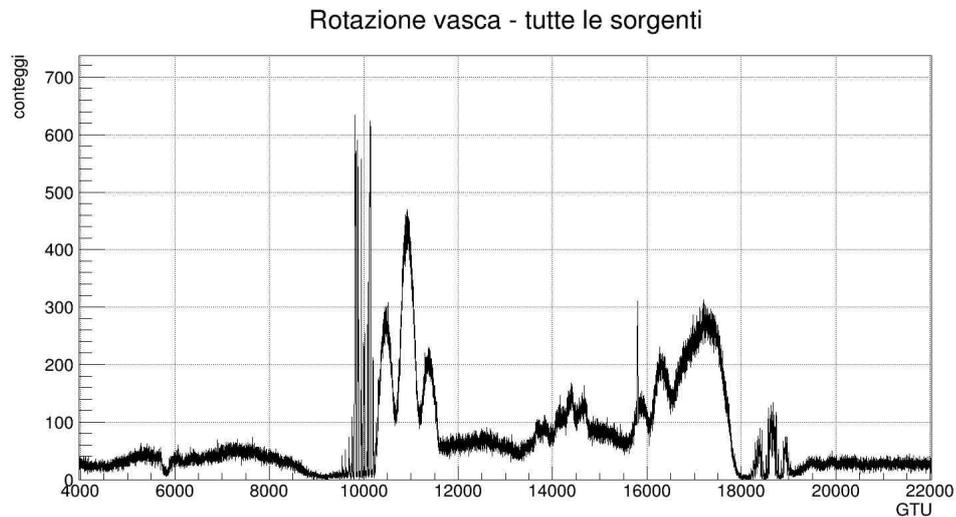


Figura 4.27: Grafico della rotazione della vasca, ottenuto con il segnale di fondo generato dal LED, velocità di  $10^{-2} m/s$  e tutte le sorgenti luminose ed i materiali riflettenti montati sulla piattaforma girevole che forma il fondo della vasca; il grafico raffigura la somma dei 24 pixels in esame ed è l'ingrandimento di una rotazione.

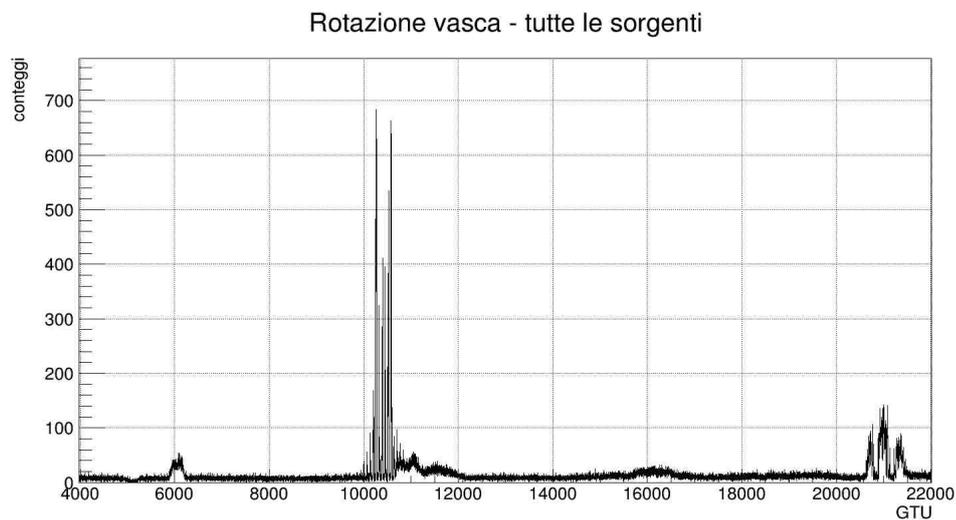


Figura 4.28: Grafico della rotazione della vasca, ottenuto con lo schermo riprodotto il fondo cielo fisso alla lunghezza d'onda tra 565 e 590 nm (colore giallo), velocità di  $10^{-2} m/s$  e tutte le sorgenti luminose ed i materiali riflettenti montati sulla piattaforma girevole che forma il fondo della vasca; il grafico raffigura la somma dei 24 pixels in esame ed è l'ingrandimento di una rotazione.

Vengono inoltre mostrati due grafici di confronto da cui si deduce che è sufficiente modificare l'ordine o la presenza di alcuni elementi o persino le sole condizioni di luce ambientale per ottenere riproduzioni differenti di orbite che il telescopio JEM-EUSO registrerà dalla Stazione Spaziale Internazionale nelle sue orbite intorno alla Terra.

Nella Figura 4.29 si ha il confronto tra la misura in Figura 4.27, ottenuta con tutte le sorgenti ed i materiali illuminati dal LED (grafico blu) ed una misura nelle stesse condizioni di illuminazione ma con le sorgenti emettitrici ed i materiali riflettenti assenti (grafico verde). Si nota che le zone riproducenti il fondo luminoso ottenuto tramite le riflessioni degli elementi ambientali rimangono costanti, mentre le sorgenti specifiche sono assenti nel secondo caso.

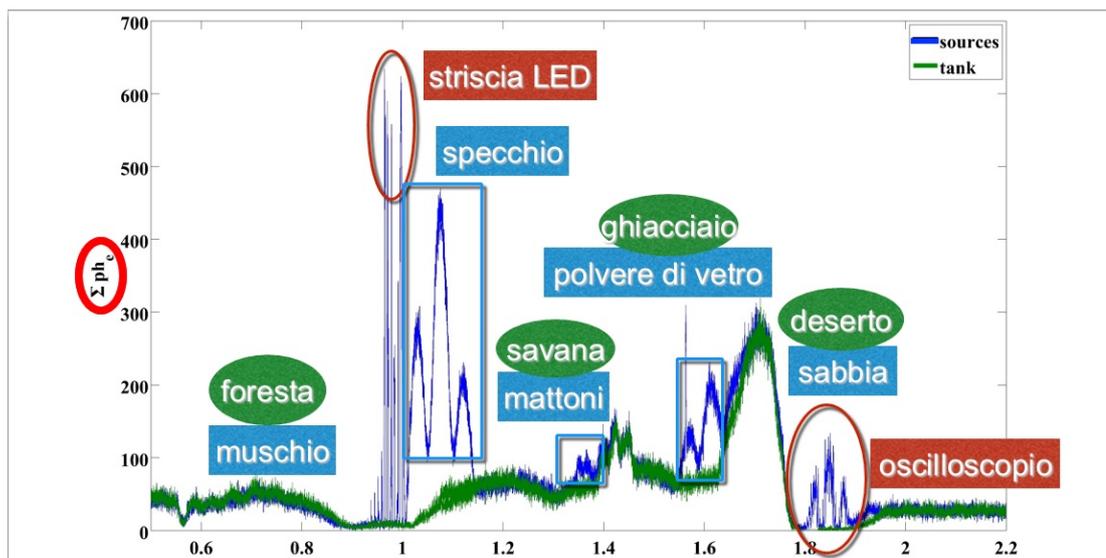


Figura 4.29: Grafico del confronto tra presenza (grafico blu) ed assenza (grafico verde) di sorgenti emettitrici e materiali riflettenti, a parità di condizioni ambientali.

Nella Figura 4.30 si ha invece il confronto tra le due misure mostrate precedentemente. Il grafico blu raffigura le sorgenti ed i materiali illuminati dal LED che genera il segnale di fondo, mentre il grafico verde raffigura la stessa situazione ma con il LED spento. Si nota infatti che le sorgenti luminose indipendenti (come la piattaforma Arduino o l'oscilloscopio) sono presenti in entrambi i casi mentre tutti i materiali riflettenti non sono più visibili nel caso di spegnimento del LED.

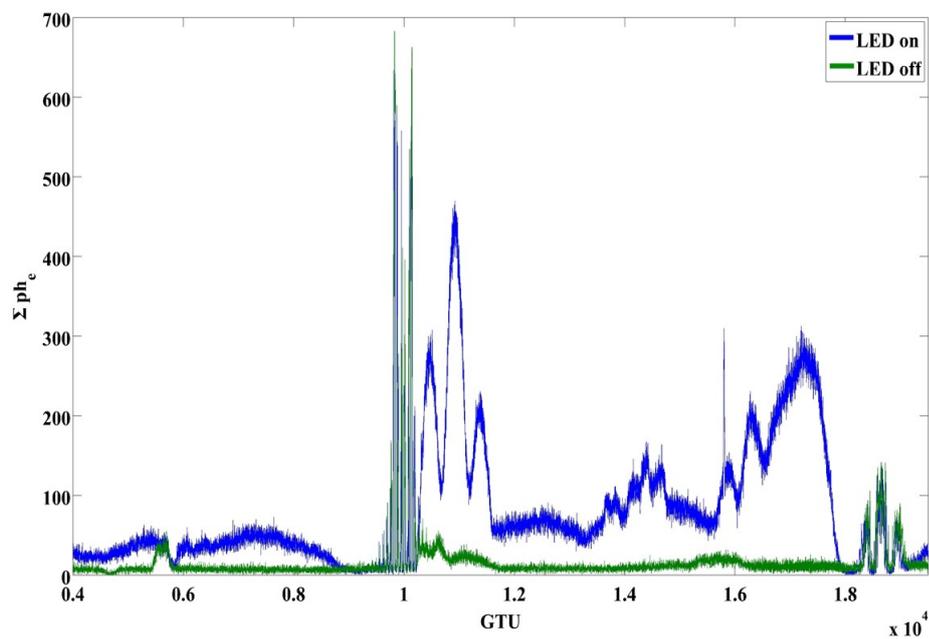


Figura 4.30: Grafico del confronto tra due diversi fondi ambientali. La linea blu rappresenta la condizione di LED acceso, la linea verde la condizione di LED spento.

## 4.9 Nona campagna di misure

La nona campagna di misure (Febbraio 2014) è stata dedicata a due studi sistematici.

Il primo è stato lo studio della risposta del PMT e di sonde per la misurazione di diverse altezze di onde, generate perturbando mediante l'emissione di vento l'acqua con cui è possibile riempire la vasca. Sono inoltre state variate le condizioni di luminosità di fondo con cui veniva illuminata l'apposita apertura dei pannelli di sughero, rappresentata in Figura 4.31, attraverso la quale il PMT è in grado di osservare la superficie d'acqua sottostante.

Le condizioni di luminosità utilizzate sono state:

- un LED concentrato (all'interno di un cannoncino), montato alla stessa altezza dell'apertura dei pannelli, come mostrato nella Figura 4.31, evidenziato in rosso;
- il LED non concentrato, posizionato sul pannello metallico sospeso al soffitto (già utilizzato nella campagna precedente) per ottenere una luminosità più uniforme;
- una lampadina ad incandescenza, situata sotto uno dei pannelli in sughero triangolari (a due pannelli di distanza dall'apertura, come mostrato nella Figura 4.31, evidenziata in giallo anche se non visibile), in modo da illuminare l'acqua tramite una sorgente intensa, ma distante rispetto alla visuale del PMT.

Nel caso del LED concentrato posto in basso, si sono rivelati picchi molto marcati in presenza del vento acceso alla massima velocità, come si può vedere nel grafico in Figura 4.32 (in cui si raggiungono i 5000 conteggi). Con il LED non concentrato posto in alto invece la quantità di picchi presenti era molto inferiore, nonostante il vento avesse la stessa velocità del caso precedente, come si può vedere nel grafico in Figura 4.33 (in cui non vengono mai superati i 450 conteggi).



Figura 4.31: Fotografia dell'apertura tramite cui il PMT osserva le turbolenze dell'acqua generate dal vento. Sono indicate anche le due sorgenti utilizzate per illuminare l'acqua.

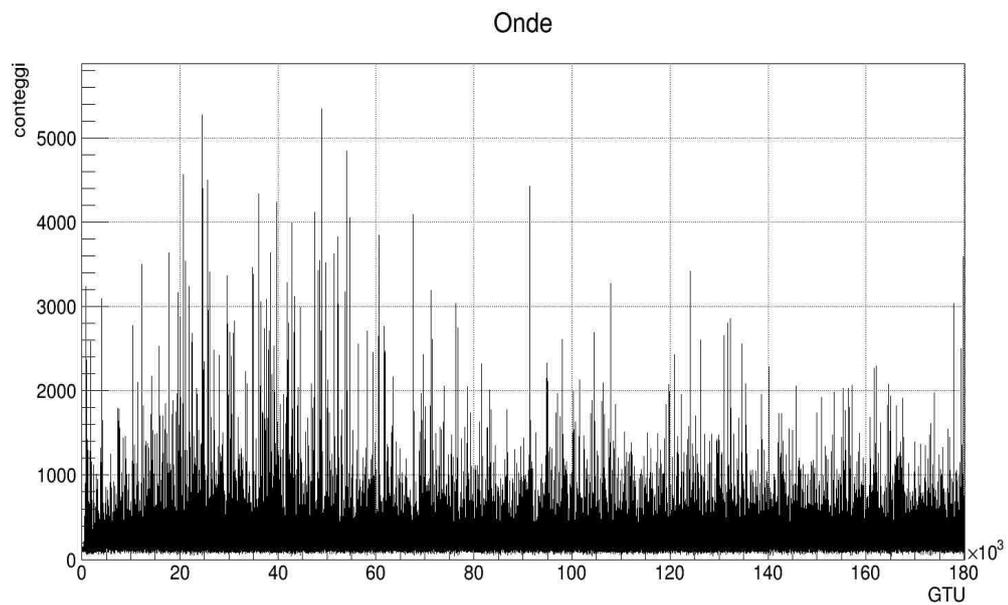


Figura 4.32: Grafico della risposta del PMT alle riflessioni dell'acqua, increspata con velocità del vento pari a 50 Hz ed illuminata dal LED concentrato (alimentato con una tensione di 3.4 V); il grafico raffigura la somma dei 24 pixels.

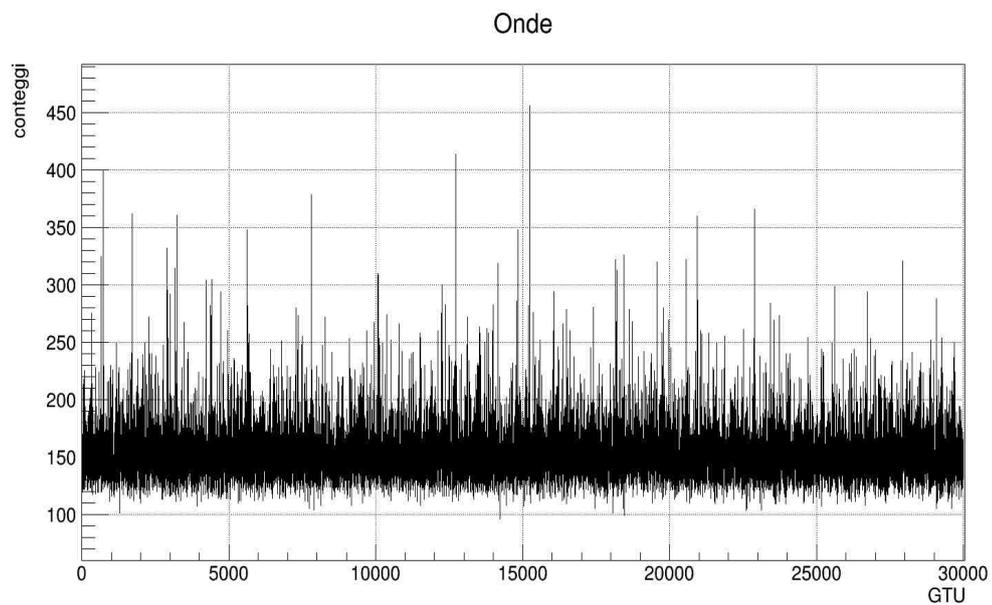
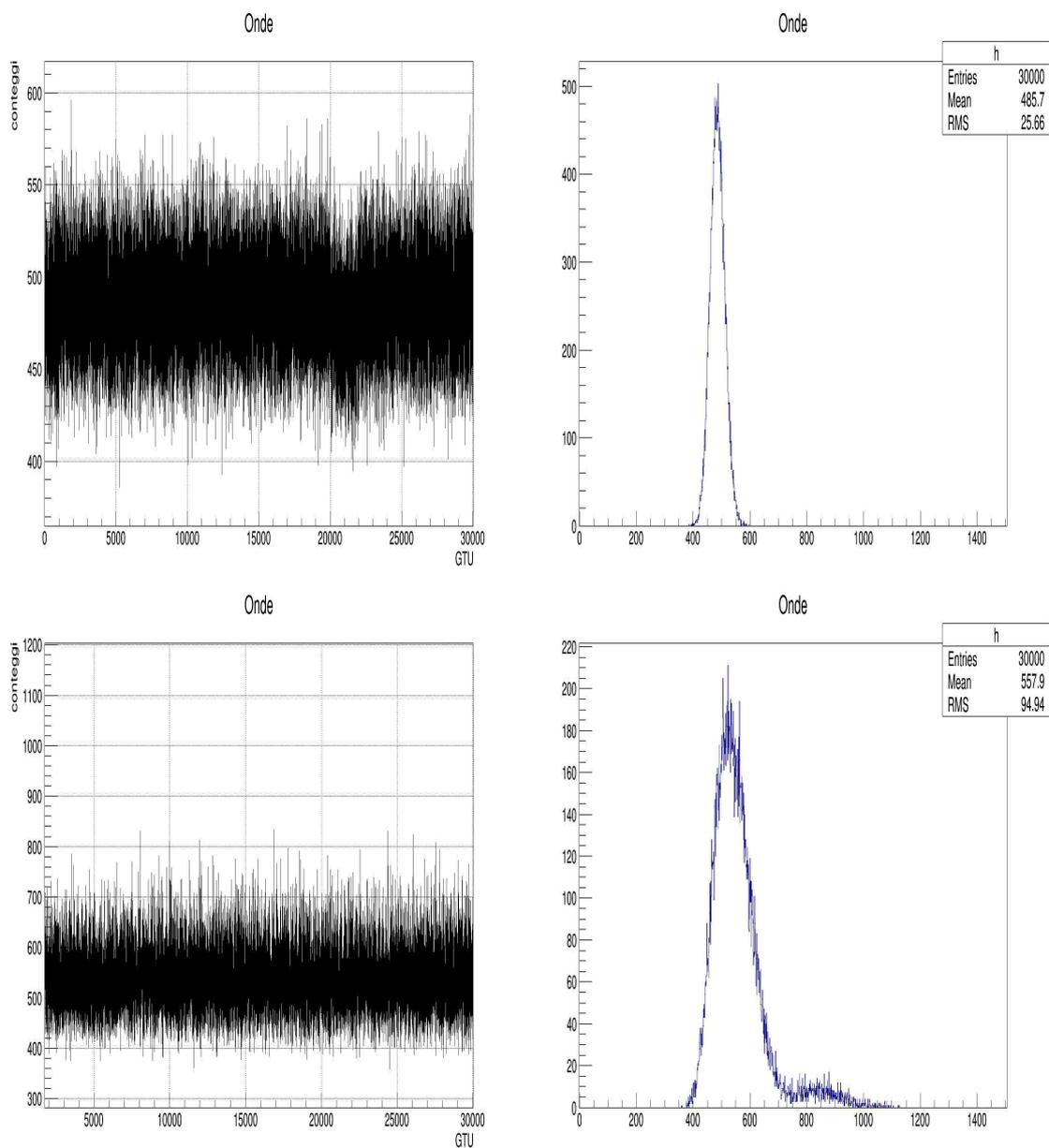


Figura 4.33: Grafico della risposta del PMT alle riflessioni dell'acqua, increspata con velocità del vento pari a 50 Hz ed illuminata dal LED non concentrato; il grafico raffigura la somma dei 24 pixels.

Utilizzando la lampadina ad incandescenza, in grado di riprodurre al meglio una situazione di luce diffusa, si è studiato in modo più sistematico, come si può vedere nei grafici della Figura 4.34, la differenza tra le diverse velocità del vento (rispettivamente 15, 30 e 50 Hz). Come si può notare, il primo grafico ha - come previsto - un andamento pressochè costante, con luminosità media pari a circa 483 conteggi/GTU mentre con velocità superiori si ha la presenza di picchi di riflessione che, nella terza configurazione, superano i 2000 conteggi/GTU.



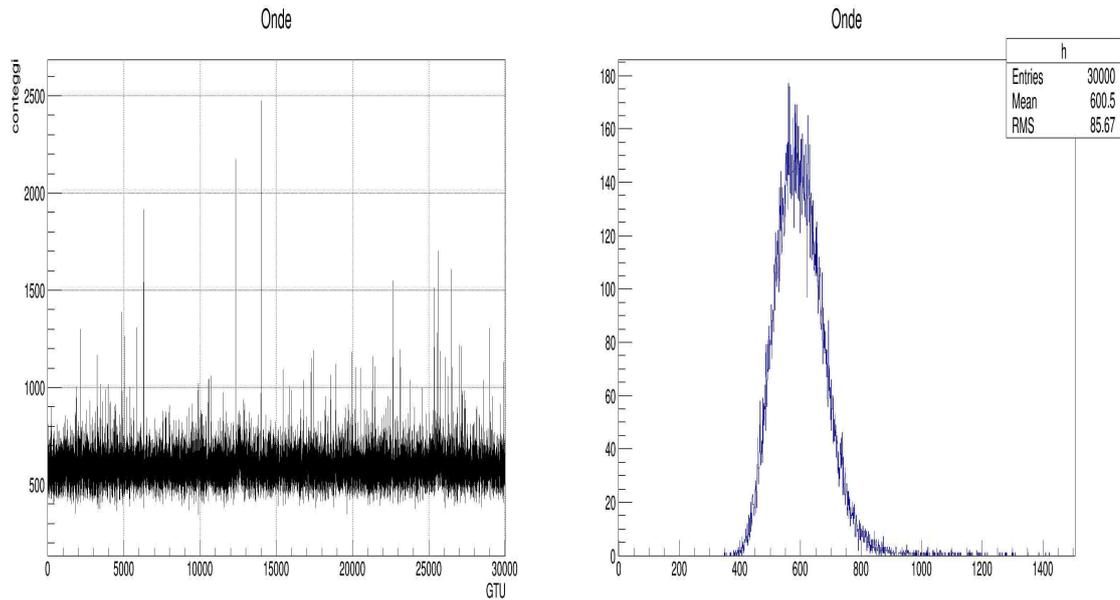


Figura 4.34: Grafici della risposta del PMT alle riflessioni dell'acqua, illuminata dalla lampadina ad incandescenza; i grafici a sinistra raffigurano la somma dei 24 pixels, quelli a destra gli istogrammi delle misure. Le tre righe di grafici si differenziano per la velocità del vento, pari rispettivamente a 15, 30 e 50 Hz.

Tramite queste misure è stato effettuato uno studio sulla variazione della distribuzione in funzione della velocità del vento (due esempi sono mostrati in Figura 4.35). Contando quanti eventi si presentano oltre  $3\sigma$  si è quindi ottenuto un grafico di crescita, mostrato nella Figura 4.36.

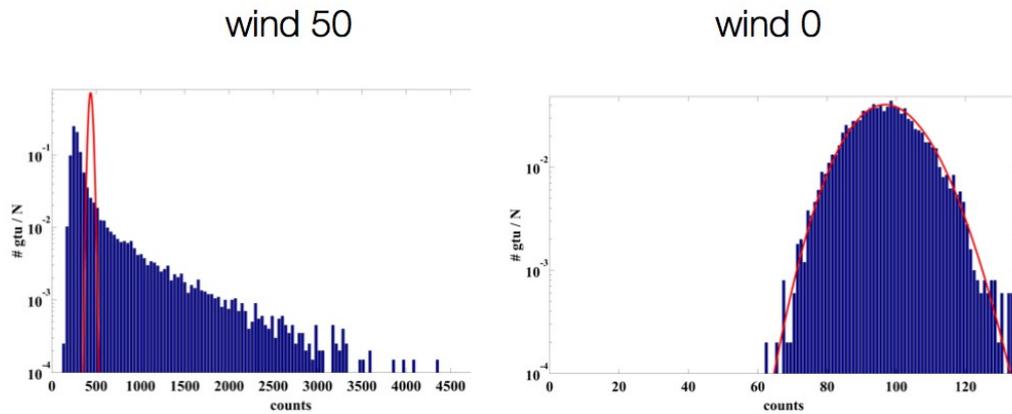


Figura 4.35: Grafici delle distribuzioni ottenute rispettivamente con velocità del vento pari a 50 Hz e 0 Hz, a parità di condizioni di luminosità ambientale. Nel primo caso è evidente la coda della distribuzione, non presente nel secondo caso.

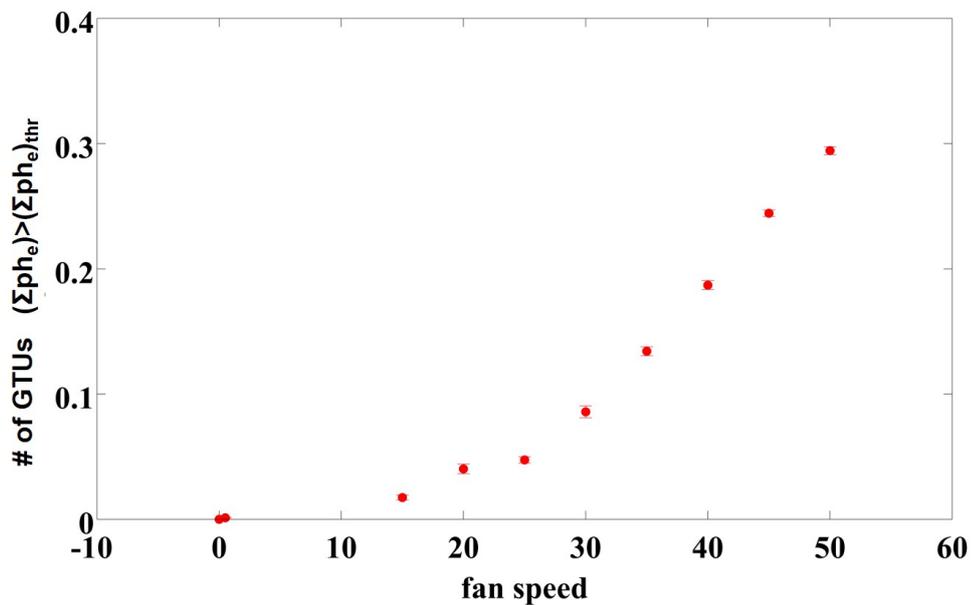


Figura 4.36: Grafico raffigurante il numero di GTUs oltre  $3\sigma$  delle distribuzioni, in funzione delle velocità del vento.

È stata inoltre effettuata un'analisi di Fourier, utilizzando i dati acquisiti con le sonde di profondità delle onde. I risultati (mostrati in Figura 4.37) mostrano come le frequenze cui si rivelano i picchi di segnale sono le stesse di quelle delle altezze delle onde, quindi l'evolversi dei picchi di luce segue le altezze. Si può quindi concludere che è possibile misurare l'altezza delle onde tramite la variazione della luminosità rivelata.

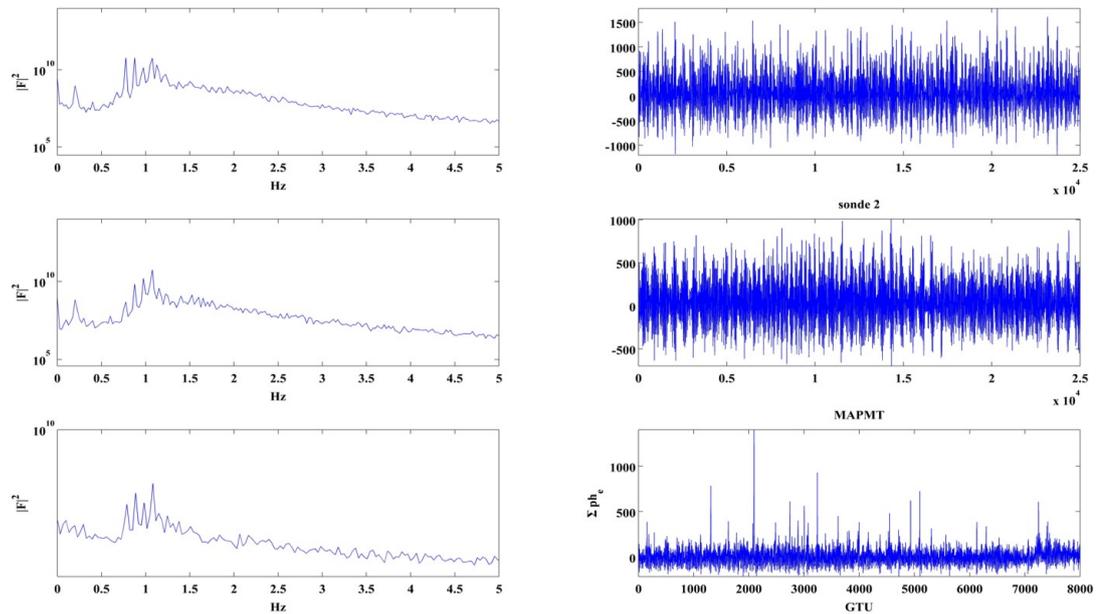


Figura 4.37: Grafici raffiguranti l'analisi di Fourier effettuata sulle misure effettuate. A sinistra sono presenti i grafici delle sonde di profondità; a destra le misure di luminosità, rappresentanti la somma dei 24 pixels. Le tre righe di grafici si differenziano per la velocità del vento, pari rispettivamente a 15, 30 e 50 Hz.

Il secondo è lo studio sistematico delle riproduzioni di raggi cosmici di diverse energie tramite la piattaforma Arduino, alimentata con resistenze di diversa intensità. Variando sia l'intensità luminosa degli eventi che quella del fondo ambientale, si riescono ad ottenere le basi per lo studio delle condizioni estreme in cui l'algoritmo del trigger di primo livello dovrà riconoscere la presenza o meno di raggi cosmici in diverse condizioni ambientali. È stata trovata una configurazione ottimale (mostrata nella Figura 4.38), nella quale il valor medio del fondo (28 conteggi/GTU) suddiviso per i 24 pixels, dà una media di circa 1 conteggio/pixel/GTU (vicino all'obiettivo di segnale di fondo luminoso prefissato) mentre i picchi interessano 4-5 pixels, ottenendo una media di circa 20 conteggi/pixel/GTU (confrontabile con il valore atteso per i raggi cosmici di circa  $10^{20}$  eV).

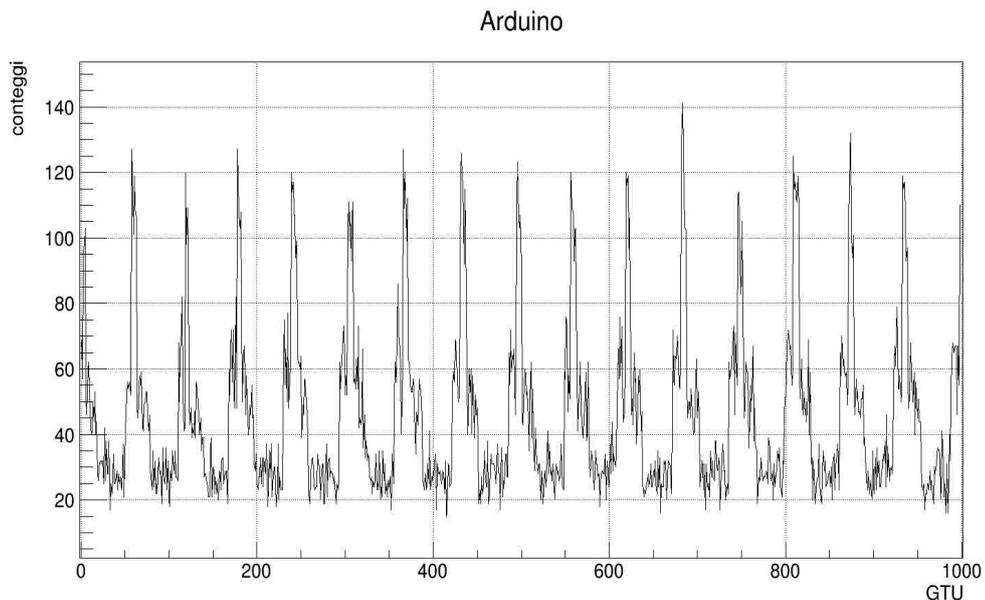


Figura 4.38: Grafico della risposta del PMT alla piattaforma Arduino, ottenuto con la vasca ferma, una resistenza a monte dei LEDs pari a  $330\text{ k}\Omega$  e il segnale di fondo generato dal LED alimentato con  $2.8\text{ V}$ ; il grafico raffigura la somma dei 24 pixels.

Variando la resistenza connessa alla fila di LEDs e la tensione di alimentazione del LED che genera il segnale di fondo luminoso (come mostrato nella tabella 4.2) si è ottenuto un insieme di dati con segnali di fondo pari a circa 1, 2, 3 e 4  $phe/pixel/GTU$  e raggi cosmici di differenti energie.

Resistenza ( $k\Omega$ )	Fondo (conteggi/GTU)	Picchi (conteggi/GTU)
470	27	78
470	50	106
470	77	130
470	101	160
560	29	72
560	54	100
560	77	127
560	108	143
680	29	70
680	51	95
680	80	105
680	103	140
820	31	60
820	48	80
820	77	110
820	105	140
1200	30	50
1200	54	75
1200	80	100
1200	106	130

Tabella 4.2: Tabella riassuntiva delle misure effettuate con la piattaforma Arduino e la corrispondente media dei risultati ottenuti dalla somma di tutti i pixels del PMT. I valori delle resistenze sono espressi in  $k\Omega$ , quelli del fondo ambientale e dei picchi di segnale (rappresentanti i raggi cosmici) in conteggi/GTU.

In seguito alle misure, ci si è accorti che i LEDs controllati dalla piattaforma Arduino generavano spot luminosi molto ampi, per cui sono state realizzate delle guaine termorestringenti per ogni LED in modo da concentrare i singoli fasci. Effettuato il miglioramento del sistema tramite le guaine e scelte opportunamente le resistenze, è stata quindi eseguita una nuova serie di misure (in tabella 4.3), che mostra il buon livello raggiunto nella riproducibilità di eventi veloci.

Resistenza (k $\Omega$ )	Fondo (conteggi/GTU)	Picchi (conteggi/GTU)
12	21	40/120
12	34	60/150
12	52	70/160
12	72	100/180
27	27	40/180
27	54	70/200
27	76	100/220
27	105	140/240
39	28	50/150
39	52	70/160
39	77	100/190
39	105	130/220

Tabella 4.3: Tabella riassuntiva delle misure effettuate con la piattaforma Arduino dopo il miglioramento del set-up sperimentale tramite le guaine termorestringenti e la corrispondente media dei risultati ottenuti dalla somma di tutti i pixels del PMT. I valori delle resistenze sono espressi in k $\Omega$ , quelli del fondo ambientale e dei picchi di segnale (rappresentanti i raggi cosmici,) in conteggi/GTU. Nel caso dei picchi sono stati riprodotti raggi cosmici di intensità differenti all'interno della stessa misura.

## 4.10 Decima campagna

La decima campagna (Maggio 2014) non ha visto ulteriori miglioramenti nel set-up sperimentale, ma è stata dedicata a test con la piattaforma Arduino, collegata a dei LEDs e a guide di luce formate tramite fibre ottiche, a forma di porzioni di cerchi concentrici (quarti di giro), come mostrato in Figura 4.39, al fine di riprodurre gli Elves (trattati nel ¶ 2.2.3).

La maggiore limitazione del set-up sperimentale utilizzato è stata determinata dal numero limitato di pixels (25), pari a  $\sim 10\%$  di una cella elementare (256 pixels). Per rappresentare il percorso di un raggio cosmico pressochè verticale, questo è un problema minore dato che il segnale insiste solo su pochi pixels, ma nel caso di città o semplicemente di dati di fondo luminoso, si presenta la necessità di riprodurre tutti i pixels.

Per superare tale problematica, sono stati ricampionati in modo casuale nel tempo i dati dei pixels misurati ed attribuiti tali valori ai rimanenti pixels. In altre parole sono stati associati  $\sim 9$  pixels virtuali ad ogni pixel fisico. I dati nei 10 pixels sono simili, semplicemente rimescolati nel tempo. Questo è accettabile ad un primo livello di approssimazione, tenendo conto che sono necessari insiemi di dati più lunghi per essere sicuri di riprodurre propriamente le fluttuazioni.

Partendo quindi dai dati riguardanti la riproduzione di raggi cosmici con fondi luminosi differenti (effettuati nella campagna precedente), si è proceduto ad un'operazione di inserimento di eventi singoli all'interno di files di puro fondo (opportunamente riscaldati nel modo descritto sopra, al fine di ottenere un'ipotetica cella elementare), sia di intensità fissa che crescente, per usarli poi come dati di ingresso per l'algoritmo di trigger. La procedura adottata ha dato esiti positivi.

La campagna in esame è stata dedicata allo studio di tale algoritmo, scritto tramite il linguaggio VHDL<sup>2</sup>, una cui schermata è raffigurata in Figura 4.40 ed il

---

<sup>2</sup>Il VHDL (VHSIC Hardware Description Language, dove VHSIC è la sigla di Very High Speed Integrated Circuits) è un linguaggio di descrizione dell'hardware, nato da un progetto del Dipartimento di Difesa statunitense, nel 1987. È il linguaggio più usato per la progettazione di sistemi elettronici digitali ed è lo strumento fondamentale per la progettazione dei moderni circuiti integrati digitali. Le

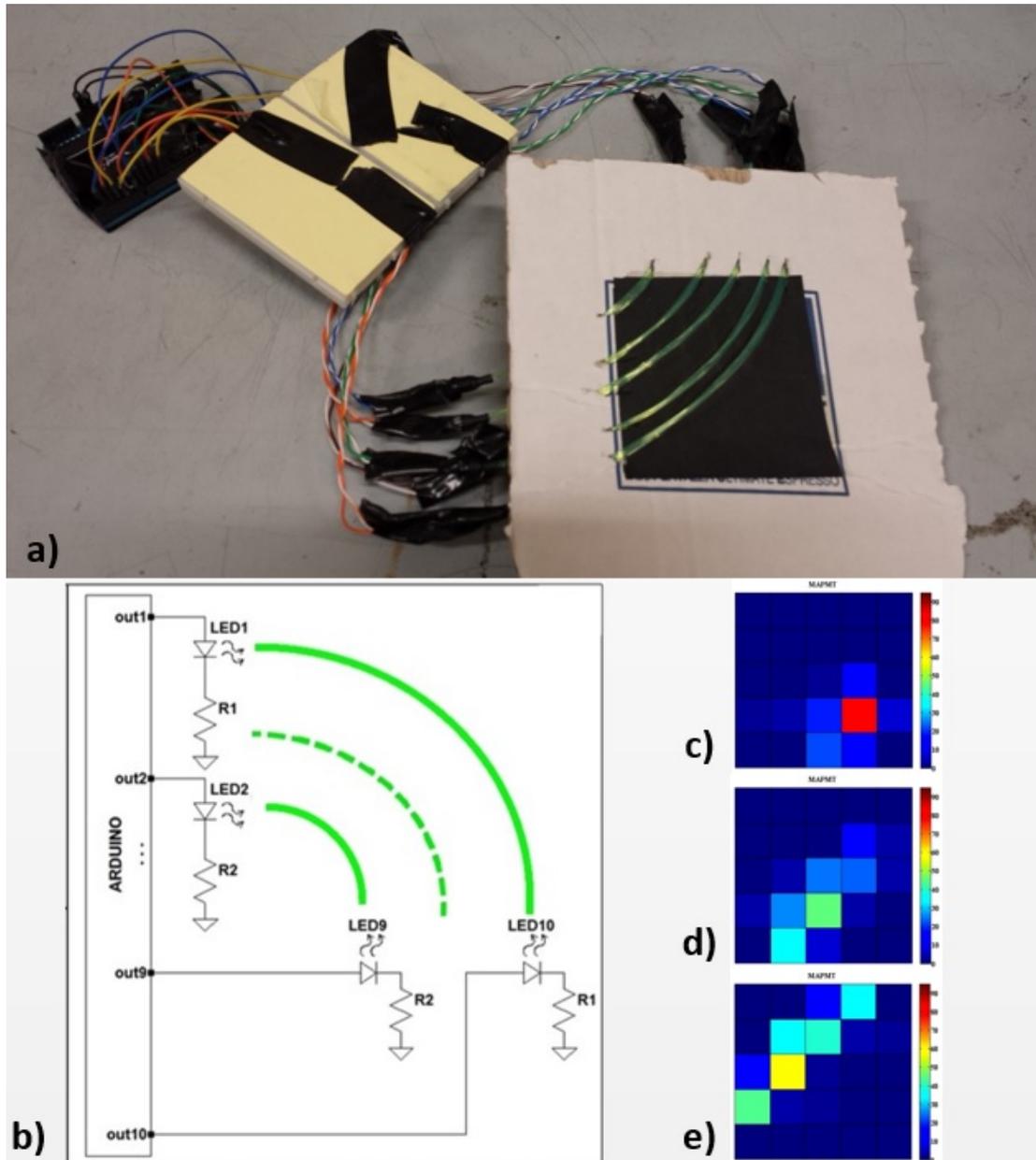


Figura 4.39: Le immagini rappresentano: a) fotografia della piattaforma Arduino collegata ad un sistema di LEDs e guide di luce, accesi in sequenza per riprodurre dei quarti di cerchi concentrici in espansione, per la riproduzione artificiale dei fenomeni atmosferici detti Elves; b) schema elettrico del circuito utilizzato; c)-d)-e) sequenza dei pixels del MAPMT illuminati in questa configurazione.

cui funzionamento specifico è trattato in Bertaina *et al.*, 2014b [19].

Il passo successivo è stato quello di ricreare, tramite programmi scritti in sue applicazioni spaziano dai microprocessori, alle comunicazioni, all'automobile e molte altre.



sui pixels in esame).

Una volta studiato in modo approfondito l'algoritmo di trigger ed avendolo validato in diverse condizioni, grazie a tutti gli eventi ricostruiti, è stato anche possibile scrivere dei programmi in linguaggio ROOT che ne ampliassero le funzionalità. È stato infatti compilato un programma in grado di acquisire i “pre-triggers” in uscita dal VHDL ed estrarre da essi i triggers effettivi, tenendo conto del contatore di conferma, spiegato nel ¶ 2.2.2. Un secondo programma acquisiva questi triggers effettivi e simulava lo spegnimento del sistema di acquisizione di JEM-EUSO, una volta acquisito un insieme di dati significativo (il sistema ha bisogno di circa 20 ms per trasferire i dati acquisiti che hanno superato l'esame del trigger).

Tutti i risultati ottenuti nella campagna in esame verranno mostrati nel Capitolo 5.

### 4.11 Undicesima campagna di misure

L'undicesima campagna di misure (Luglio 2014) è stata dedicata nuovamente allo studio delle perturbazioni dell'acqua, al fine di ottenere un nuovo insieme completo di misure riguardanti la risposta del PMT nella rivelazione di onde superficiali dell'acqua, in diverse condizioni di luminosità ambientale. Per tali misure, la vasca è stata riempita con circa 50 cm d'acqua, l'apertura tramite cui è visibile l'acqua al di sotto del PMT è stata illuminata con un LED posto all'interno di uno dei cilindretti che convergono la luce e fissato al fototubo stesso, in modo da ottenere uno spot pressochè verticale nella riflessione della luce (si veda la Figura 4.41). La velocità del vento, come nelle campagne precedenti, è stata modificata da 0 Hz fino a 50 Hz.

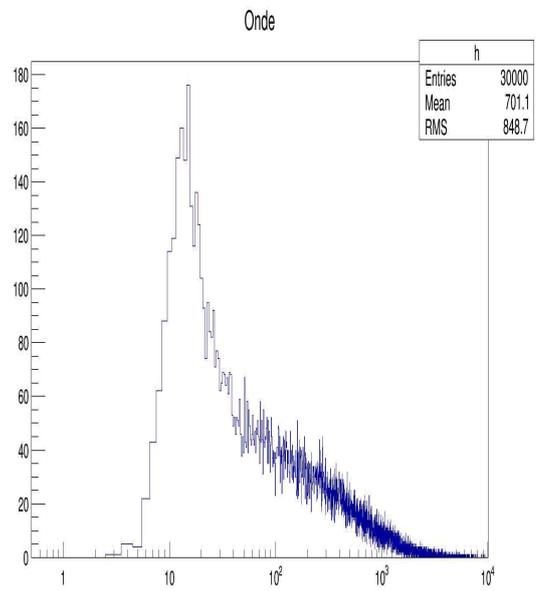
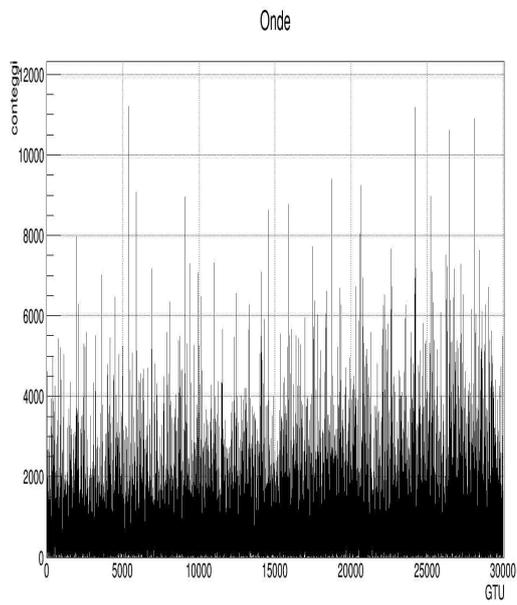
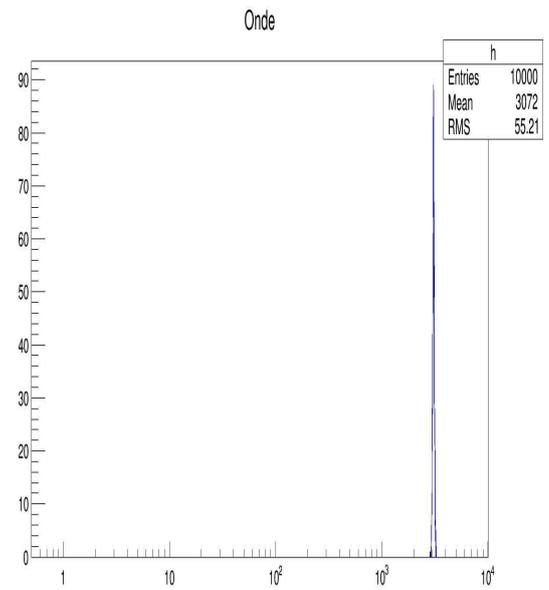
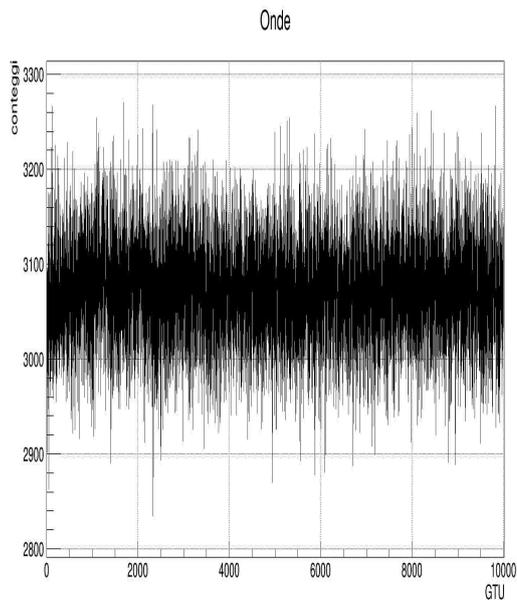


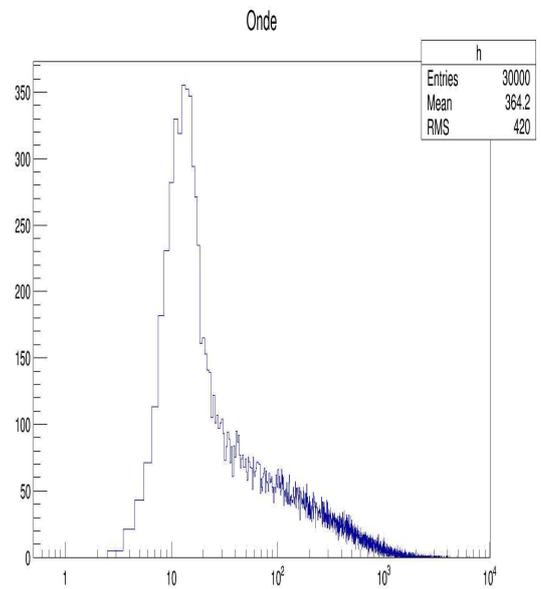
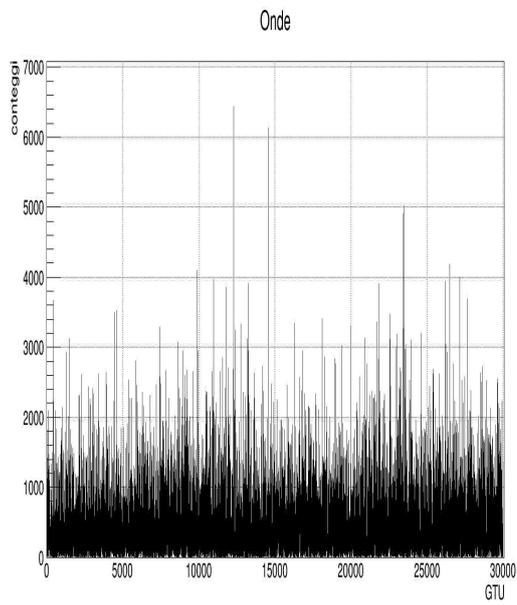
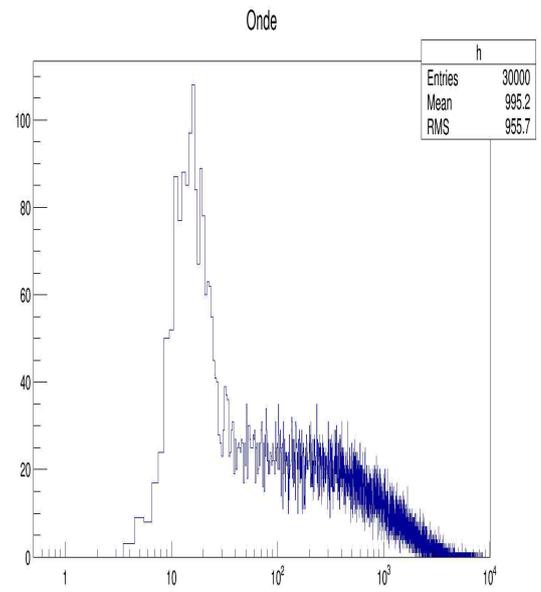
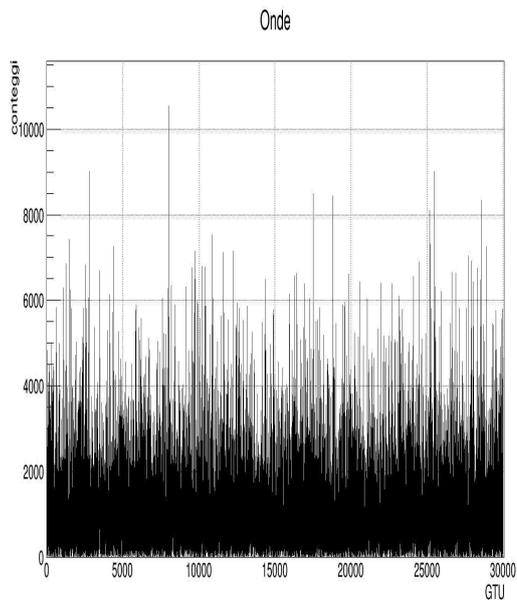
Figura 4.41: Configurazione del LED posto in parallelo al tubo collimatore del PMT, tale da creare uno spot verticale nella riflessione della luce sull'acqua.

Viene mostrato l'insieme finale di dati, riportati in tabella 4.4 e nella Figura 4.42, da cui si evince la modifica delle distribuzioni con il variare della velocità del vento.

Velocità del vento (Hz)	Media (conteggi/GTU)	Picchi (conteggi/GTU)
0	3072	–
15	701.1	$1.1 \cdot 10^4$
20	995.2	$10^4$
25	364.2	$6 \cdot 10^3$
30	234.3	$3.5 \cdot 10^3$
40	146.1	$4 \cdot 10^3$

Tabella 4.4: Tabella riassuntiva delle misure effettuate con diverse velocità del vento (espresse in Hz) e la corrispondente media dei risultati ottenuti dalla somma di tutti i pixels del PMT; i valori nella seconda e nella terza colonna (espressi in conteggi/GTU) rappresentano la media del fondo ed i valori dei picchi raggiunti.





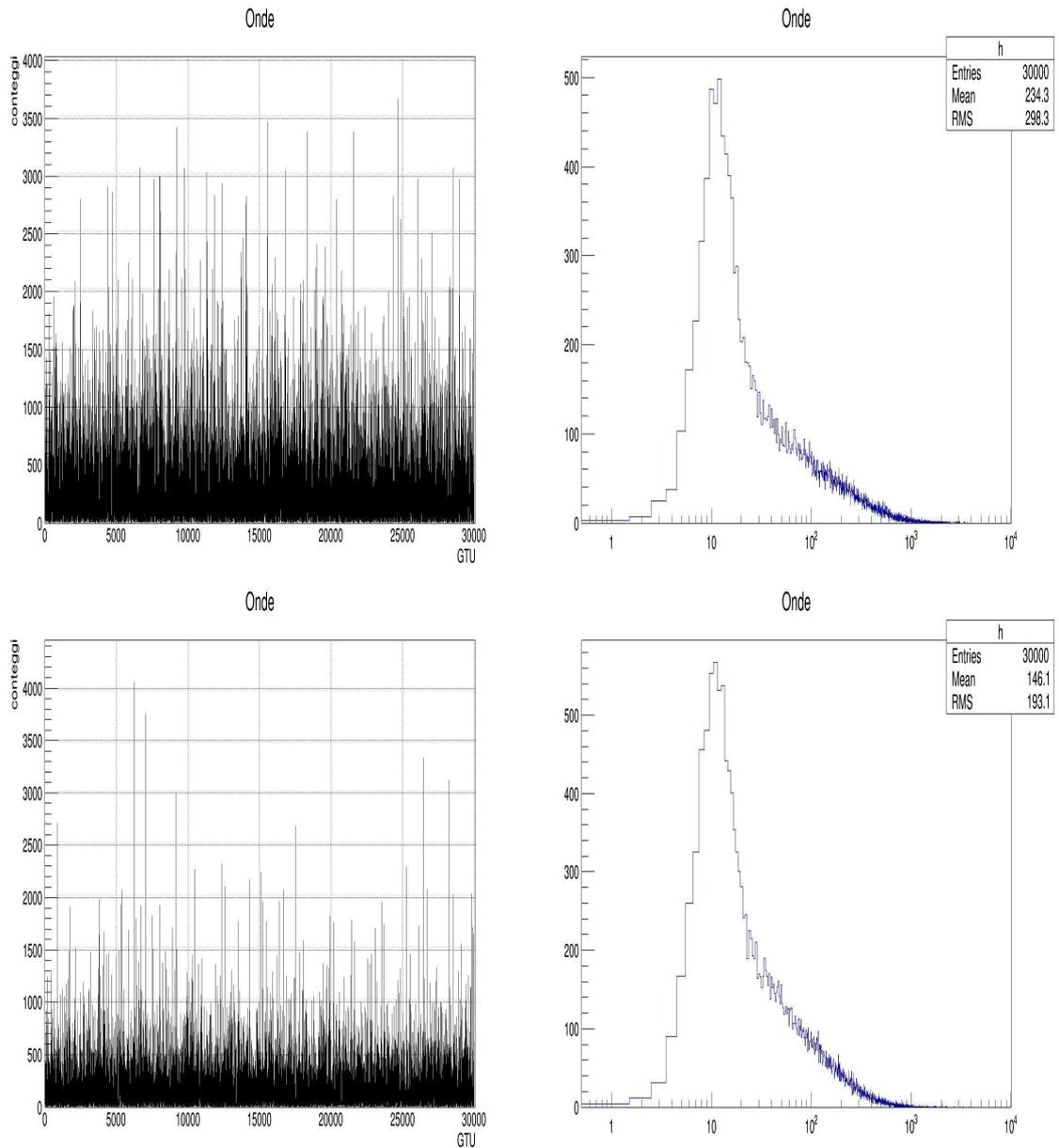


Figura 4.42: Grafici della risposta del PMT alle riflessioni dell'acqua, illuminata dal LED parallelo al fototubo; i grafici di sinistra raffigurano la somma dei 24 pixels, quelli di destra gli istogrammi delle misure. Le sei righe di grafici si differenziano per la velocità del vento, pari rispettivamente a 0, 15, 20, 25, 30 e 40 Hz.

## Capitolo 5

# Discussione e Sviluppi futuri

### 5.1 Discussione dei risultati ottenuti

Partendo dai risultati mostrati nel Capitolo 4, vengono qui presentate le conclusioni tratte dal lavoro effettuato durante il Dottorato di Ricerca.

Un lavoro preliminare e parallelo per riprodurre le variazioni di segnale di fondo luminoso UV è stato effettuato tramite simulazioni al computer. Iniziando da dati noti sull'emissione luminosa più bassa proveniente dalla Terra nell'intervallo UV (Garipov *et al.*, 2005 [31]) (misure notturne, nel mezzo dell'oceano, senza Luna) ed usando i dati provenienti dal DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) [54], è stata stimata l'intensità luminosa che sarà vista da JEM-EUSO, dovuta alle sorgenti artificiali confrontate con il fondo luminoso atteso (dovuto alla brillantezza intrinseca del cielo notturno)<sup>1</sup>. Sapendo che tale brillantezza sugli oceani è pari a  $\sim 1 \text{ phe/pixel/GTU}$  (come spiegato nel ¶ 2.2.3), sono state prodotte simulazioni di conteggi dovute a possibili scenari differenti, utilizzando i dati acquisiti nelle prime due campagne di misura.

La Figura 5.1 mostra i risultati di due simulazioni che ricreano i conteggi attesi: a) & b) attraverso il centro Italia, con una serie di aree urbane, di estensioni differenti, alternate con aree rurali scure ed il mare; c) & d) durante un passaggio sopra una delle isole Eolie, ovvero una sorgente luminosa isolata e molto localiz-

---

<sup>1</sup>Maggiori dettagli sono riportati in Adams Jr. *et al.*, 2013 [1].

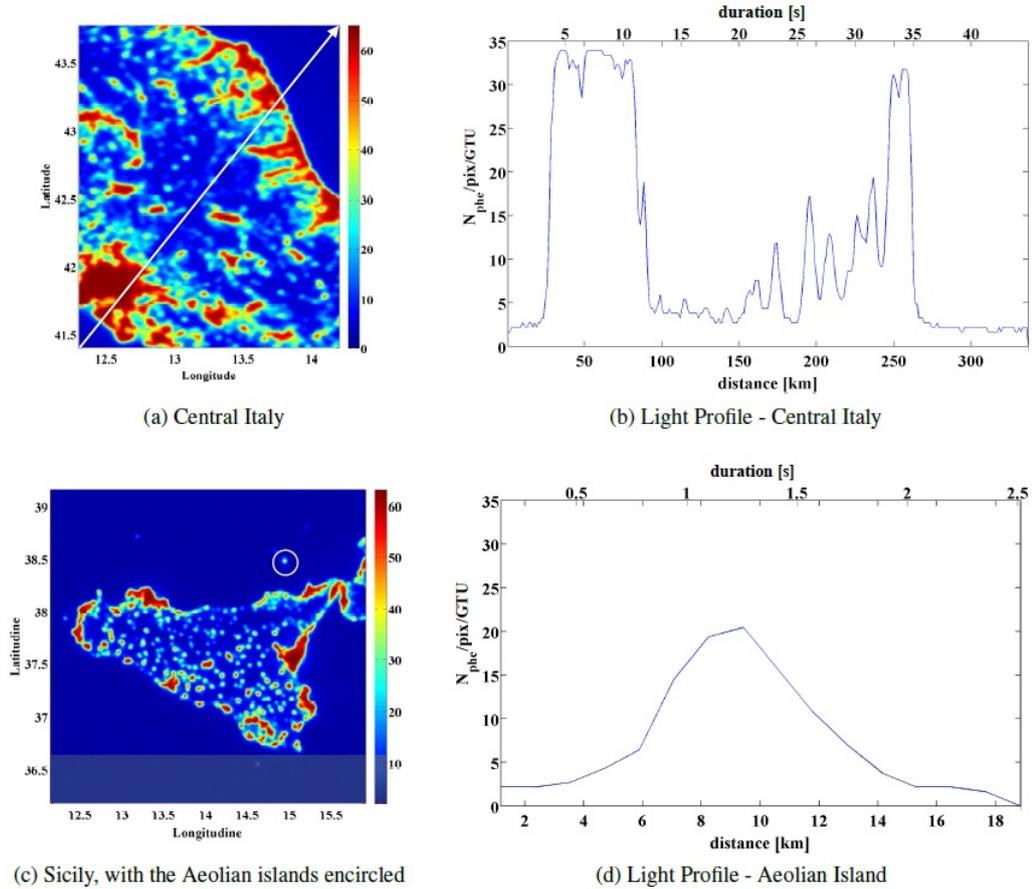


Figura 5.1: La figura rappresenta le simulazioni effettuate. Le immagini sulla sinistra rappresentano i dati originali del DMSP sulle aree geografiche considerate nella simulazione. I grafici sulla destra mostrano i conteggi attesi (profilo di luce, espresso in  $N_{phe}/pixel/GTU$ ) per JEM-EUSO in funzione sia dell'estensione spaziale che della durata temporale, nella direzione della freccia in a) e lungo il cerchio in c).

zata. Il risultato è confrontabile con le misure reali ottenute con il pallone BaBy (Catalano *et al.*, 2002 [23]), in cui il livello di luminosità aumenta di 1-2 ordini di grandezza. La saturazione nella luminosità visibile sulle aree urbane è un effetto presente nei dati del DMSP.

Non volendo però effettuare un lavoro rivolto solo alle simulazioni, sono stati acquisiti diversi insiemi di misure (descritti nel dettaglio nel Capitolo 4) in differenti condizioni, al fine di riprodurre il maggior numero di eventi che il telescopio JEM-EUSO potrà incontrare nelle sue orbite attorno alla Terra.

Vengono quindi elencati nel seguito gli obiettivi che ci si prefiggeva di ripro-

durre tramite il set-up sperimentale descritto nel ¶ 3.2:

- un fondo ambientale notturno di  $500 \text{ fotoni}/(m^2 \cdot ns \cdot sr)$ , pari a circa  $1 \text{ phe}/\text{pixel}/\text{GTU}$  nelle unità di JEM-EUSO;
- un fondo ambientale crescente per la riproduzione di eventi quali il sorgere della Luna;
- raggi cosmici di diversa intensità, con un andamento simile a quello indicato in Figura 5.2;
- eventi luminosi quali fulmini che avvengano nella cella elementare in esame o in una cella elementare vicina;
- passaggi di meteore classiche o con doppio picco lungo la cella elementare;
- passaggio di un nuclearite lungo la cella elementare;
- eventi di vaste dimensioni, come coste e città, che entrano ed escano nel campo di vista del rivelatore.

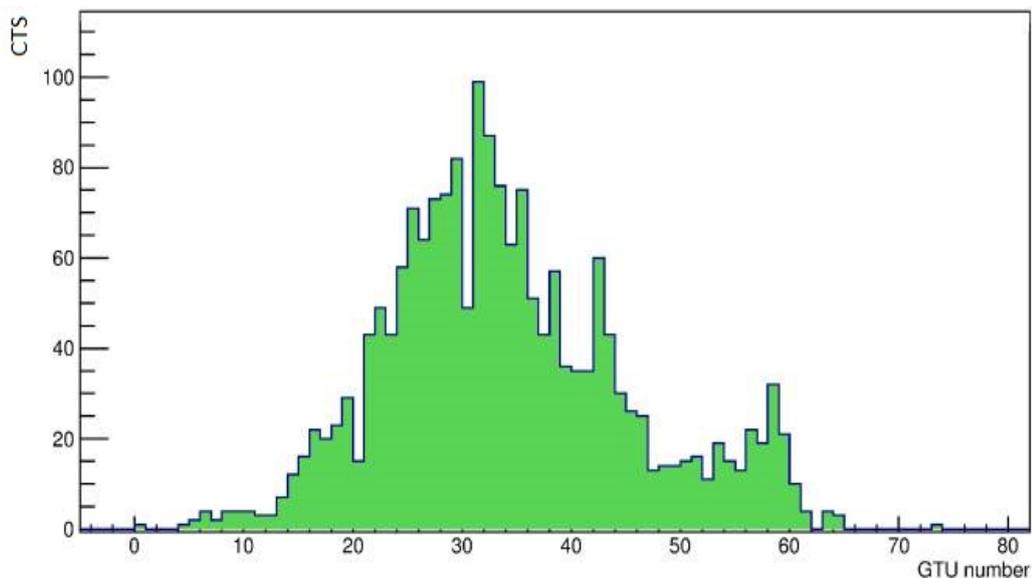


Figura 5.2: Curva di conteggi/GTU di un raggio cosmico con energia di  $2 \cdot 10^{20} \text{ eV}$ .

Nonostante la strumentazione in uso al TurLab sia ancora lontana dagli standard di JEM-EUSO, sia per quanto riguarda la superficie focale (un MAPMT da 25 pixels, paragonato ai 4932 MAPMTs da 64 pixels), sia per quanto riguarda l'elettronica (una GTU di 40  $\mu s$  campionata ogni 30  $ms$ , paragonata ad una GTU di 2.5  $\mu s$ ), si è riusciti ad ottenere ottimi risultati nella riproduzione di tali fenomeni.

### **Riproduzione di fondi luminosi e sciame estesi in aria**

Come visto nel Capitolo 4, sono state condotte misure lunghe di segnale luminoso di fondo costante o variabile al fine di ottenere dati di fondo sufficienti per effettuare il mescolamento dei pixels (descritto nell'ambito della decima campagna). Il set-up sperimentale è stato in grado di riprodurre il valore atteso tramite l'uso dello schermo che riproduce luci di diverse intensità e lunghezze d'onda (descritto nella quarta campagna) o del LED di luce bianca (descritto nell'ottava campagna). Allo stesso modo è stato possibile riprodurre fondi ambientali di intensità crescente o decrescente tramite la proiezione di intensità variabili tramite lo schermo.

Oltre alla riproduzione di tali fondi ambientali, in presenza dei quali è possibile allestire set-up sperimentali per la riproduzione di eventi specifici, è anche possibile inserire, a posteriori, eventi brevi o lunghi all'interno degli insiemi di dati grazie all'uso di software apposito. In tal modo è possibile creare sequenze di eventi sempre diversi anche senza la necessità di effettuare tali riproduzioni nell'ordine voluto.

Per riprodurre un'intera cella elementare partendo dal MAPMT da 25 pixels è stato utilizzato l'algoritmo descritto nella decima campagna e, tramite tale riproduzione, è stato possibile verificare l'algoritmo del trigger di primo livello in presenza di tutti gli eventi ricreati.

Per quanto riguarda i raggi cosmici (o sciame estesi in aria), sono stati usati i dati ottenuti tramite la piattaforma Arduino (nell'ambito della nona campagna) e sono stati inseriti direttamente all'interno dei dati ricostruiti della EC.

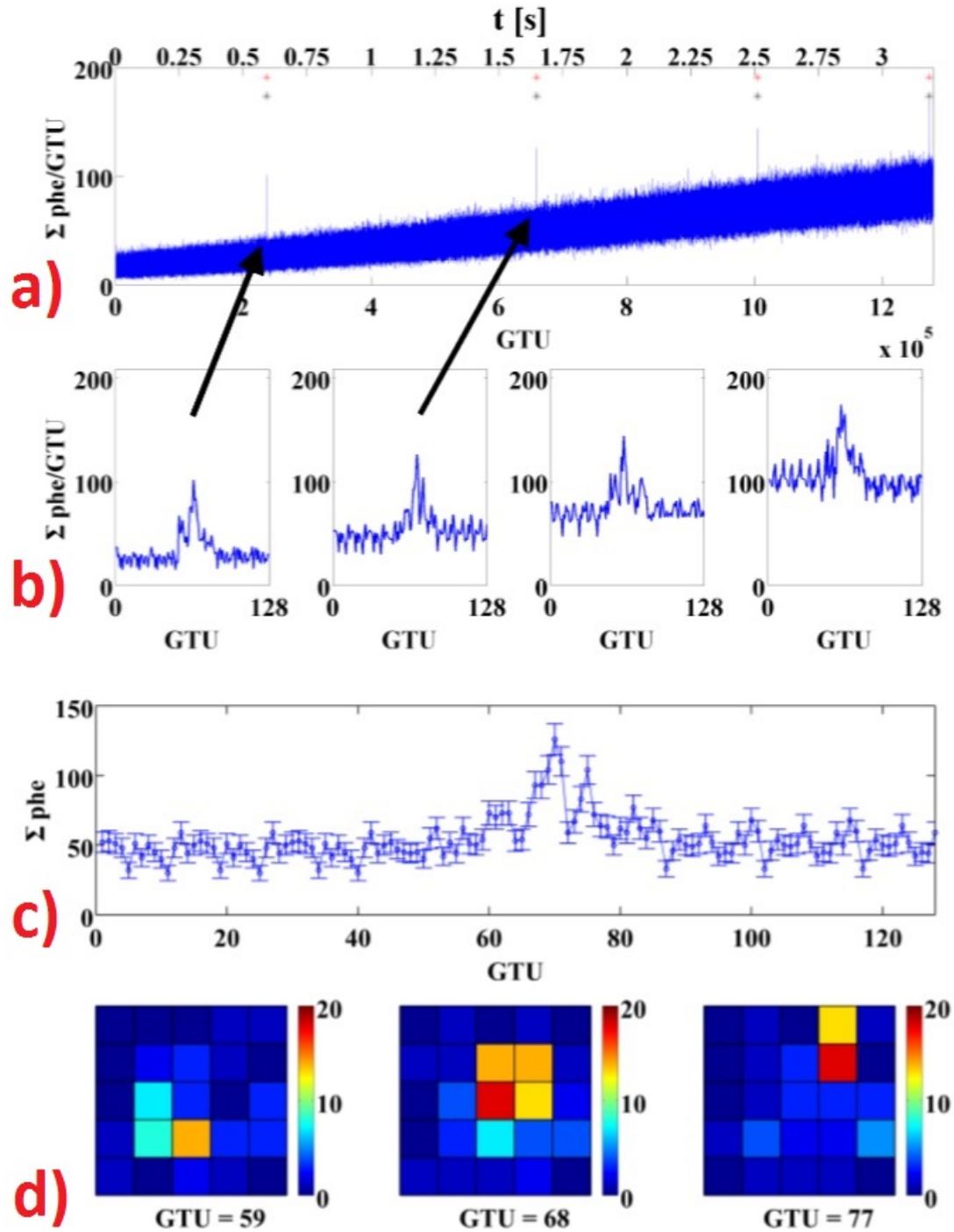


Figura 5.3: Immagini della ricostruzione di raggi cosmici in una cella elementare. Nei grafici a) e b) è mostrata la riproduzione di 4 eventi simili a UHECR all'interno di 3 secondi di dati di segnale luminoso di fondo variabile (le frecce indicano i primi due). Gli asterischi indicano il momento in cui l'algoritmo del trigger ha restituito un segnale nel codice VHDL. Il grafico c) mostra l'ingrandimento del secondo evento, mettendo in risalto il profilo di luce in 128 GTUs con l'eccesso di luminosità causato dai LEDs attorno alla GTU 70. I grafici d) mostrano le immagini istantanee di 3 diverse GTUs durante l'avvenimento dell'evento.

La Figura 5.3 mostra un esempio di tali eventi. In essa sono riportati 3 secondi di dati con un segnale di fondo luminoso variabile tra  $\sim 1$  e  $\sim 4$  conteggi/pixel/GTU. Su questo livello di fondo sono stati inseriti 4 eventi acquisiti in condizioni di fondo simile, sostituendo il contenuto dei 25 pixels fisici. Ogni percorso dello sciame ha una durata di 35-40 GTUs. Viene inoltre mostrato un ingrandimento delle 128 GTUs in cui avvengono gli eventi. Gli asterischi indicano il tempo in cui è avvenuto il trigger e si può notare come esso coincida sempre col singolo evento ricostruito. L'aggiustamento delle soglie rispetto al fondo variabile evita che avvengano triggers indesiderati. La differenza tra gli asterischi rossi e quelli neri è basata rispettivamente sul presupposto di avere o meno un tempo morto di 20 ms dopo un evento triggerato dovuto al trasferimento di dati (si veda il programma descritto nella decima campagna). Gli eventi riprodotti artificialmente hanno una forma ed un'intensità confrontabili con l'evento da  $2 \times 10^{20}$  eV mostrato nella Figura 5.2.

Eventi quattro volte meno luminosi sono stati triggerati con altrettanto successo. Tali eventi corrispondono a  $\sim 5 \times 10^{19}$  eV, che è la soglia energetica degli eventi usati da JEM-EUSO per scopi scientifici. Il livello di fondo usato per gli eventi corrisponde per JEM-EUSO a  $\Phi = 500 - 2000$  fotoni  $\cdot m^{-2} \cdot ns^{-1} \cdot sr^{-1}$  per un cielo limpido, ossia le condizioni assunte per determinare la curva di esposizione riportata in Adams Jr. *et al.*, 2013 [1] e nelle pubblicazioni successive.

### Riproduzione di fulmini

Anche la riproduzione dei fulmini ha dato risultati positivi. La simulazione è stata effettuata sovrapponendo pure in questo caso l'evento al fondo ambientale.

La Figura 5.4 mostra il caso dello stesso segnale ottenuto dalla riproduzione di un fulmine, visto da due celle elementari differenti: quella sulla sinistra ha il fulmine nel proprio campo di vista, mentre quella sulla destra rivela la luce diffusa dall'ottica durante l'evento. Gli eventi sono stati generati usando la stessa tecnica di rimescolamento descritta precedentemente.

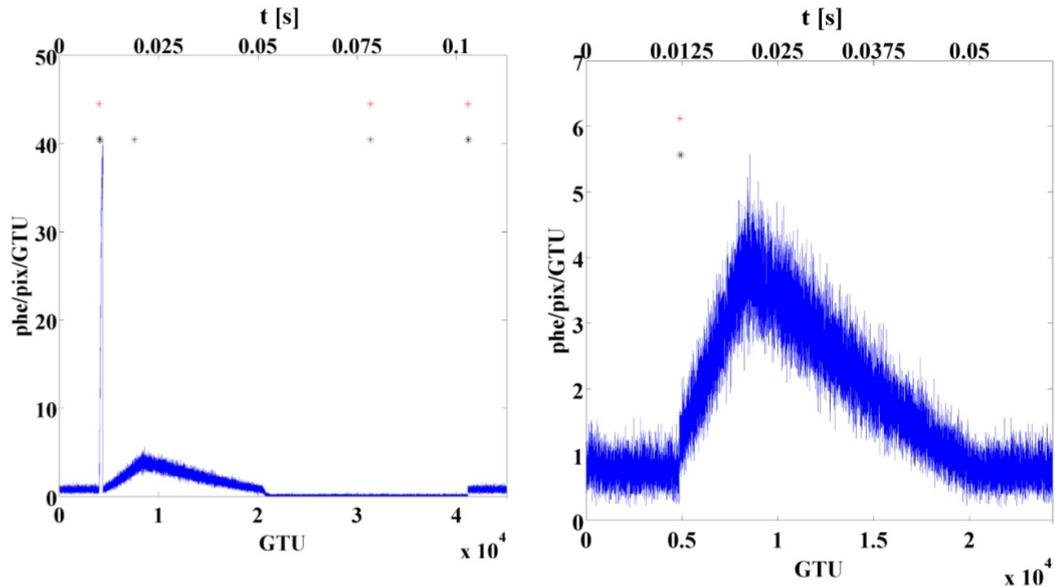


Figura 5.4: Riproduzione dello stesso fulmine visto da una cella elementare nel campo di vista del fulmine (grafico di sinistra) e da un'altra che rivela solo la luce diffusa sul telescopio durante l'evento (grafico di destra). Gli asterischi indicano il momento in cui l'algoritmo del trigger ha restituito un segnale nel codice VHDL. Si veda il testo per una spiegazione dettagliata delle configurazioni luminose.

Si assume che il fulmine duri  $\sim 40$  ms ed inizi  $\sim 13$  ms dopo l'inizio del tempo di acquisizione. La luce aumenta per  $\sim 12$  ms, raggiunge un massimo e quindi decresce, svanendo  $\sim 25$  ms dopo il massimo. La forma differente del segnale sulle due celle elementari è dovuta alle ragioni spiegate nel seguito.

Nel caso in cui il fulmine si trovi nel campo di vista della cella, dopo un certo lasso di tempo dall'inizio dell'evento, l'intensità del segnale rivelato è così elevata che si attiva il sistema di protezione di JEM-EUSO (Von Ballmoos *et al.*, 2013 [68]). A quel punto, con un ritardo di qualche GTUs, l'efficienza del rivelatore del PMT viene ridotta di un fattore 100 e l'intensità del segnale precipita. Nonostante ciò, l'emissione di luce cresce ancora e quindi il segnale rivelato comincia a salire di nuovo ma ad un ritmo più lento, dovuto all'efficienza di rivelazione limitata. Circa 12 ms dopo l'inizio, il fulmine raggiunge il massimo e la luce comincia a decrescere fino alla fine dell'evento, 25 ms dopo; il sistema di protezione di JEM-EUSO

rimane però attivo ed il segnale rivelato dalla cella elementare è estremamente debole. Circa 100 ms dopo l'inizio, viene ristabilita l'efficienza di rivelazione fotonica standard ed avviene un improvviso aumento del segnale.

È presente un trigger all'inizio dell'evento, seguito da un secondo  $\sim 12$  ms dopo. Assumendo il tempo morto di  $\sim 20$  ms tra gli eventi (spiegato nell'ambito della decima campagna), questo secondo trigger andrebbe perso (infatti è presente solo l'asterisco nero, in quanto il rosso tiene conto di questo tempo morto). Un trigger aggiuntivo si presenta anche durante la parte più scura dell'evento, compatibile con il tasso di triggers casuali. L'ultimo trigger avviene di nuovo quando il fondo luminoso rivelato torna al valore normale in quanto si ha una transizione improvvisa dell'efficienza di rivelazione. In generale, la logica del trigger reagisce alla sequenza luminosa, come ci si aspettava e dato che i fulmini avvengono raramente, non è un grosso problema per questo sistema. In realtà le misure di fulmini sono uno degli obiettivi esplorativi di JEM-EUSO (come trattato nel ¶ 2.2.3), quindi l'algoritmo del trigger dimostra la sua sensibilità nel rivelare la fase iniziale crescente dell'evento. L'attivazione del sistema di protezione è una conferma della presenza di una sorgente di luce estremamente brillante, quindi la combinazione delle due azioni potrebbe essere usata per avviare un'acquisizione speciale per eventi in concomitanza di temporali.

Il grafico sulla destra della figura mostra la luce vista da una cella elementare dovuta alla luce diffusa dal sistema ottico. Questa cella rivela un aumento di luminosità che segue un andamento simile all'altra; la differenza risiede nel fatto che l'intensità è molto più debole e non si ha l'attivazione del sistema di protezione. Anche in questo caso l'improvvisa fase crescente dell'evento attiva un trigger, mentre l'evoluzione dell'evento viene gestita dall'assestamento automatico delle soglie e non avvengono ulteriori triggers.

## Riproduzione di meteore

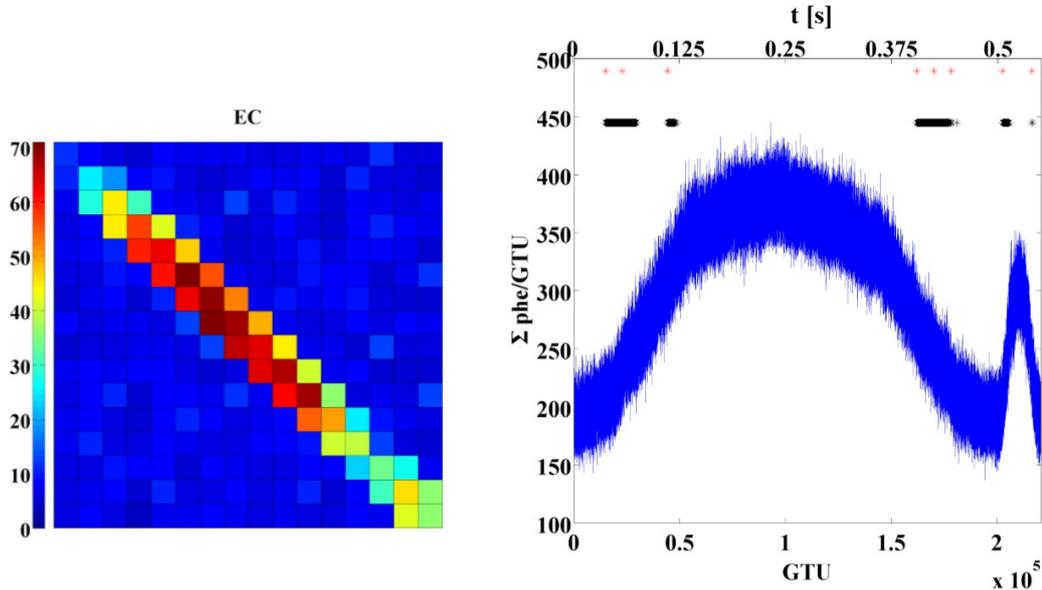


Figura 5.5: Riproduzione del profilo di luce di una meteora che attraversa la cella elementare nel campo di vista. L'aumento di luce nella fase conclusiva è dovuto ad un picco finale. A sinistra è raffigurata la cella elementare su cui avviene il passaggio in diagonale dell'evento; a destra il grafico temporale dell'evento con i triggers attivati e mostrati dagli asterischi neri e rossi.

L'esempio mostrato nella Figura 5.5 si riferisce ad una meteora con doppio picco, caratterizzata da un secondo aumento di segnale verso la parte finale del profilo di luce. L'evento dura  $\sim 0.5$  s. Il profilo di luce della meteora è stato ottenuto illuminando tutti i 25 pixels del PMT con un'intensità di luce variabile nel tempo. Per riprodurre il movimento spaziale della meteorica, il segnale di alcuni pixels vicini (tra 1 e 4, variabili nel tempo) è stato inserito all'interno dei dati di fondo luminoso e spostato nello spazio al fine di riprodurre l'evoluzione del tragitto lungo la cella elementare. Non è stato infatti possibile utilizzare in questo caso i dati acquisiti appositamente nelle campagne ma sono in atto degli sviluppi per migliorare la riproduzione di questo tipo di eventi; questo esercizio preliminare è stato comunque molto istruttivo.

L'insieme dei dati dell'evento è stato inserito all'interno del codice VHDL e,

come mostrato nella Figura 5.5, si sono ottenuti molti triggers. Ciò è dovuto al fatto che il calcolo del livello di fondo luminoso viene stimato a blocchi di  $4 \times 2$  pixels (come spiegato nel ¶ 2.2.2), mentre lo spot di segnale è largo solo 4 pixels. Inoltre il trigger non si attiva continuamente, perchè le soglie vengono cambiate, anche se non abbastanza velocemente, ed il sistema di conferma del trigger non è in grado di eliminare l'evento poichè si richiedono 72 GTUs attivate di seguito. Intorno al massimo del profilo di luce il segnale è così intenso che il trigger viene disabilitato assegnando il livello più alto delle soglie.

Questo esempio mostra che lo schema attuale dell'algoritmo di trigger non è sufficiente per eliminare questo tipo di eventi. Molto probabilmente però il trigger di secondo livello sarà in grado di evitarli, basandosi sulle ripetute richieste di attivazione provenienti dalla stessa cella elementare in un così breve intervallo di tempo.

D'altro canto le meteore sono un altro degli obiettivi esplorativi della missione (come trattato nel ¶ 2.2.3). È importante sottolineare che sciami estesi in aria e meteore hanno lo stesso andamento lineare della luce, ma un intervallo temporale decisamente differente. Una semplice modifica della GTU da  $2.5 \mu s$  ad un intervallo di qualche ms, permetterebbe di applicare esattamente lo stesso schema di due livelli di trigger descritto nel ¶ 2.2.2. Una descrizione più dettagliata delle caratteristiche degli eventi di meteora, così come il concetto di uno schema di trigger dedicato si trova in Bertaina *et al.*, 2014 [18].

Lo stesso lavoro è stato effettuato per una meteora classica, con risultati - in termini di triggers - simili al caso semplice. Infine un lavoro simile è stato effettuato per la riproduzione del passaggio di un nuclearite lungo la cella elementare (in tal caso è stato simulato un passaggio orizzontale), in cui il numero di triggers è stato inferiore e, laddove presenti, sono da imputare ancora una volta al metodo a blocchi di  $4 \times 2$  pixels utilizzato dal codice.

## Riproduzione di città

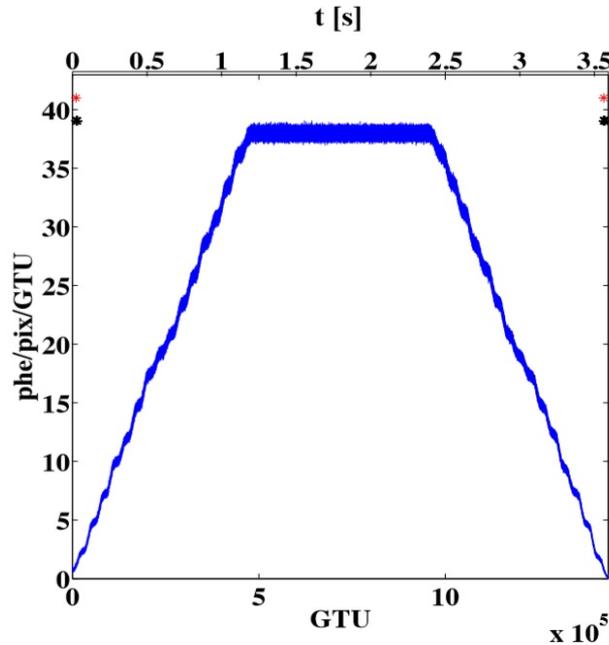


Figura 5.6: Riproduzione del profilo di luce di una città che attraversa la cella elementare nel campo di vista.

Come ultimo esempio, viene descritto un evento simile ad una città. È il tipo di evento più lento dato che l'evoluzione della luce avviene alla velocità dell'ISS. La Figura 5.6 mostra il profilo di luce di un'area urbana con un'estensione lineare di  $\sim 15 \text{ km}$ , che attraversa perpendicolarmente un lato del campo di vista della cella elementare. La durata dell'evento ricostruito è di circa 3 secondi. Durante il primo secondo sono stati fatti accendere i pixels in sequenza e con intensità crescente, durante il secondo viene mantenuta l'intensità massima e durante il terzo vi è la decrescita di intensità e lo spegnimento dei pixels in senso opposto. Il segnale aumenta di un fattore  $\sim 40$  confrontato con le condizioni standard della brillantezza intrinseca del cielo notturno. Un tale aumento è compatibile con le misure sperimentali precedenti (Catalano *et al.*, 2002 [23]).

Ogni pixel è totalmente attraversato dalla sorgente luminosa in  $\sim 1 \text{ s}$  a causa della velocità della ISS. In questo caso l'algoritmo di trigger funziona bene,

infatti si notano solo due triggers spuri. In generale la valutazione automatica del segnale di fondo luminoso medio, abbinata al meccanismo di conferma del trigger, permette di controllare il tasso di falsi triggers. Inoltre, quando il livello di fondo aumenta oltre 6.3 conteggi/pixel/GTU le soglie eliminano ogni possibile sorgente luminosa.

## 5.2 Conclusioni

In conclusione, grazie al progetto EUSO@TurLab, ideato e costruito durante gli anni del Dottorato di Ricerca, si è in grado di riprodurre - in un ambiente perfettamente controllato ed indipendente dalle condizioni climatiche - un'ampia varietà di condizioni che riproducono la luminosità in corrispondenza della superficie terrestre, quali la brillantezza intrinseca del cielo notturno, l'albedo in varie condizioni ambientali, aree urbane estese, fenomeni luminosi transienti, eventi lenti (quali le meteore) ed eventi veloci (quali i raggi cosmici).

Le prove effettuate con la strumentazione del TurLab hanno inoltre permesso di convalidare le funzioni principali dell'algoritmo di trigger. Più nel dettaglio, il sistema, che aggiusta automaticamente le soglie per mantenere il tasso di triggers sulle fluttuazioni del segnale di fondo luminoso sotto 1 Hz/EC anche in caso di variazioni lente del fondo, è efficace. Gli eventi che riproducono gli sciami estesi in aria vengono rivelati nell'intervallo di energie in cui ci si aspetta che lavori JEM-EUSO ( $E > 5 \times 10^{19}$  eV) con gli intervalli di intensità di fondo attesi. Questi risultati rafforzano quelli ottenuti in Adams Jr. *et al.*, 2013 [1] e nelle pubblicazioni successive, in quanto mostrano che il concetto adottato per il trigger in tali simulazioni può effettivamente essere implementato nell'hardware.

Per quanto riguarda gli eventi che riproducono città e fulmini, l'algoritmo si è rivelato molto efficace nel rigettarli, restituendo solo alcuni triggers spuri. Nel caso dei fulmini potrebbe essere utilizzato per acquisire le prime fasi di tali eventi; infatti la risoluzione temporale di JEM-EUSO sarà molto più veloce di quella

attualmente utilizzata dai sistemi per l'osservazione di eventi luminosi transienti.

Sembra che sia molto più complesso rigettare gli eventi che riproducono le meteore, ma il trigger di secondo livello dovrebbe bastare come filtro finale. Bisogna però ricordare nuovamente che le meteore sono una parte degli obiettivi esplorativi di JEM-EUSO e questo semplice sistema permette di ottenere triggers su esse, sebbene siano necessarie ulteriori ottimizzazioni del sistema.

### 5.3 Sviluppi futuri

Per quanto riguarda le prospettive future, bisogna dire che il lavoro effettuato (costruzione di un apparato in grado di riprodurre diversi tipi di eventi e verificare l'algoritmo del primo livello di trigger con i dati acquisiti) è solo una prima fase di un progetto più ampio.

I prossimi passi includono:

- il miglioramento del sistema di acquisizione: un numero maggiore di fotomoltiplicatori, ognuno dei quali con un numero maggiore di pixels, un'elettronica di acquisizione più veloce ed una comunicazione con il computer senza tempi morti,
- il miglioramento del set-up sperimentale con un uso più rigoroso dei LEDs e della piattaforma Arduino,
- uno studio più approfondito riguardo la tematica delle onde e la riproduzione di eventi atmosferici.

Oltre i miglioramenti citati, sono già in atto degli accordi affinché la cella elementare, prototipo della PDM utilizzata per il volo di EUSO-Balloon venga trasportata al TurLab, nel Gennaio del 2015. In tal modo sarà a disposizione tutta la strumentazione (inclusa l'elettronica originale di JEM-EUSO) per effettuare misurazioni in condizioni simili a quelle del rivelatore JEM-EUSO. Inoltre è già in progetto il test sull'intera PDM utilizzata per il volo di EUSO-Balloon, in

modo tale da ottenere risultati sempre più completi e trasformare il progetto EUSO@TurLab in un laboratorio completo per effettuare misure inerenti qualsiasi esperimento, che riguardi la rivelazione di raggi cosmici di energia estrema e di sciami estesi in aria, dallo spazio.

# Ringraziamenti

Doverosi ringraziamenti vanno innanzitutto ai miei tutor, Prof.ssa R. Caruso e Prof. M. Bertaina, che mi hanno guidato nello svolgimento di questo lavoro e grazie ai quali ho imparato a vedere con occhi diversi, più professionali, i problemi che si presentavano durante il lavoro pratico e la stesura di questa tesi, il tutto con estrema competenza e professionalità, senza tralasciare il lato umano.

Ringrazio anche la Dott.ssa A. Bowaire, il Dott. F. Crivello, la Dott.ssa R. Mulas, il Dott. G. Suino ed il Dott. P.S. Tibaldi, che hanno lavorato insieme a me alla realizzazione del progetto.

Ulteriori ringraziamenti vanno anche a G. Cotto, R. Forza, N. Guardone e M. Manfrin, che hanno contribuito alla costruzione dei set-up sperimentali ed alla risoluzione di tante problematiche riscontrate negli anni.

Infine uno speciale ringraziamento va a tutti coloro che mi hanno sostenuto in un modo o in un altro, spronandomi a non arrendermi alle varie difficoltà che man mano si andavano presentando, in particolar modo ai miei genitori che hanno sempre creduto e continuano a credere in me.

# Bibliografia

- [1] Adams Jr. J.H. *et al.* (JEM-EUSO collab.): 2013, *Astrop. Phys.*, **44**, 76-90
- [2] Afanasiev B.N. *et al.*: 1993, *Proceedings of the Tokyo Workshop on Techniques for the Study of the Extremely High Energy Cosmic Rays*, **35**
- [3] Aloisio R., Berezhinsky V. & Kachelrieß M.: 2004, *Physical Review D.*, **69**, 094023
- [4] <http://www.arduino.cc>
- [5] Auger Collaboration: 2007, *Science*, **318**, 896
- [6] Baltrusaitis R.M., Cady R. *et al.*: 1985, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **240**, 410
- [7] Barbier P. *et al.*: 2005, *Astropart. Phys.*, **22**, 439
- [8] Barbot C. & Drees M.: 2003, *Phys. Lett. B*, **533**, 107 & *Astropart. Phys.*, **20**, 5
- [9] Battistoni G. & Grillo A.F.: 2002, *Introduction to high energy cosmic ray physics*
- [10] Bayer J. *et al.*: 2011, *Proc. 32th ICRC*, **3**, 168; arXiv:1204.5065
- [11] Bayer J. *et al.*: 2013, *Proc. 33rd ICRC*, **0432**, arXiv:1307.7071
- [12] Bell C.J. *et al.*: 1974, *J. Phys. A*, **7**, 990
- [13] Berezhinsky V., Kachelrieß M. & Vilenkin A.: 1997, *Phys.Rev.Lett.*, **79**, 4302

- [14] Berezhinsky V., Blasi P. & Vilenkin A.: 1998, *Phys. Rev. D.*, **58**, 103515
- [15] Berezhinsky V., Mikhailov A.A.: 1998, *Phys. Rev. D.*, **58**, 10315
- [16] Berezhinsky V. & Kachelriebe M.: 2001, *Physical Review D.*, **63**, 034007
- [17] Bertaino M. *et al.* (JEM-EUSO collab.): 2009, *Proc. 31st ICRC*, **icrc0326**
- [18] Bertaino M., Bowaire A., Cambursano S., Caruso R., Contino G., Cotto G., Crivello F., Forza R., Guardone N., Manfrin M., Mignone M., Mulas R., Suino G. & Tibaldi P.S. (JEM-EUSO collab.): 2014a, *EUSO@TurLab: An experimental replica of ISS orbits*, to be published on EPJ Web of Conference
- [19] Bertaino M., Caruso R., Catalano O., Contino G., Fenu F., Mignone M. & Mulas R. (JEM-EUSO collab.): 2014b, *The first trigger level of the JEM-EUSO telescope for cosmic ray detection*, under preparation
- [20] Birkel M. & Sarkar S.: 1998, *Astropart. Phys.*, **9**, 297
- [21] Blumenthal G.R.: 1970, *Phys. Rev. D*, **1**, 1596
- [22] Casolino M. *et al.* (JEM-EUSO collab.): 2009, *Proc. 31st ICRC*, **icrc0770**
- [23] Catalano O. *et al.*: 2002, *Nucl. Instrum. Methods A*, **480**, 547-554
- [24] Catalano O., Maccarone M.C. & Sacco B.: 2008, *Astr. Part. Phys* bf29, 104
- [25] Diemand J., Kuhlen M., Madau P.: 2006, *astro-ph*, **0611370**
- [26] Epele L.N. & Roulet E.: 1998, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 3295
- [27] EUSO Collaboration, “EUSO Red Book - Report on the Phase A Study”: 2004, *EUSO-PI-REP*, **005**
- [28] Farrar G.R. & Biermann P.L.: 1998, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 3579
- [29] Fukushige T., Kawai A. & Makino J.: 2004, *Astrophys. J.*, **606**, 625-634

- [30] Gaisser T.K.: 1990, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press
- [31] Garipov G.K. *et al.*: 2005, *Astropart. Phys*, **24**, 400
- [32] Giacinti *et al.*, **arXiv:1006.5416**
- [33] Gorbunov D.S. & Troitsky S.V.: 2006, *Astropart. Phys.*, **23**, 175 & Abbasi R.U. *et al.* **636**, 680
- [34] Greisen K.: 1966, *Phys. Rev. Lett.*, **16**, 748; Zatsepin G.T. & Kuźmin V.A.: 1966, *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **4**, 114
- [35] Hillas A.M.: 1972, *Cosmic Rays*, Pergamon Press
- [36] Hillas A.M.: 1998, *Nature (London)*, **395**, 15
- [37] JEM-EUSO Collaboration, “EUSO Purple Book - Report on the Phase A Study”: 2010
- [38] Kachelriess M., Serpico P. & Teshima M.: 2006, *Astropart. Phys.*, **26**, 378
- [39] Kajino F. *et al.* (JEM-EUSO collab.): 2009, *Proc. 31st ICRC*, **icrc0711**
- [40] Kawasaki Y. *et al.* (JEM-EUSO collab.): 2009, *Proc. 31st ICRC*, **icrc0833**
- [41] Kuo C.-L. *et al.*: 2008, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **41**, 234014
- [42] Linsley J.: 1963a, *Phys. Rev. Lett.*, **10**, 146
- [43] Linsley J.: 1963b, *Proceedings of the 8th International Cosmic Ray Conference*, **4**, 77
- [44] Linsley J.: 1980, *Catalog of Highest Energy Cosmic Ray*, **1**, 1
- [45] Longair M.S.: 1981, *High Energy Astrophysics*, Cambridge University Press
- [46] Maekawa K. *et al.* (JEM-EUSO collab.): 2009, *Proc. 31st ICRC*, **icrc0103**

- [47] McCusker C.B.A. & Winn M.M.: 1963, *Nuovo Cimento*, **28**, 175
- [48] Medina-Tanco G. & Watson A.: 1999, *Astropart. Phys.*, **12**, 25
- [49] Medina-Tanco G. for the JEM-EUSO Collaboration, Studying individual UHECR sources with high statistics: 2009, *Proc. 31st ICRC*
- [50] Miyamoto Y. *et al.* (JEM-EUSO collab.): 2009, *Proc. 31st ICRC*, **icrc1320**
- [51] Moore B. *et al.*: 1999, *Astrophys. J. Lett.*, **524**, L19
- [52] Nagano M. & Watson A.A.: 2000, *Reviews of Modern Physics*, **72**, 689-732
- [53] Navarro J.F., Frenk C.S. & White S.D.M.: 1996, *Astrophys. J.*, **462**, 563
- [54] <http://www.ngdc.noaa.gov/eog/>
- [55] Pierre Auger Collaboration: 2010, *Astroparticle Physics*, **34**, 314-326
- [56] Puget J.L., Stecker F.W. & Bredekamp J.H.: 1976, *Astrophys. J.*, **205**, 638
- [57] Rossi B.: 1952, *High-energy Particles*
- [58] Sakar S. & Toldra R.: 2002, *Nucl. Phys.*, **621**, 495
- [59] Santangelo A., Fenu F., Ebisuzaki T., Shinozaki K. & the JEM-EUSO collaboration: 2011, *Nuclear Physics B*, **212-213**, 368-378
- [60] Sato M. *et al.*: 2005, *Int. Journal of Mod. Phys. A*, **20/29**, 6903
- [61] Sokolosky P.: 1988, *Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics*, Addison-Wesley Publishing Company
- [62] Stecker F.W. & Salamon M.H.: 1999, *Astrophys. J.*, **512**, 521
- [63] Stramignoni E.: 2013, *Tesi di laurea: Design and development of a hydrodynamic tank for studying gravity wave spectra*, Università degli Studi di Torino

- [64] Takami H., Yoshiguchi H. & Sato K.: 2004, *Astrophys. J.*, **639**, 803-815
- [65] Takeda M. *et al.*: 1999, *Astrophys. J.*, **522**, 255
- [66] Takizawa Y. *et al.* (JEM-EUSO collab.): 2009, *Proc. 31st ICRC*, **icrc0792**
- [67] <http://www.turlab.ph.unito.it>
- [68] Von Ballmoos P. *et al.*: 2013, *Proc. 33th ICRC*, **1171**, arXiv:1307.7071
- [69] Wdowczyk J., Thaczyk W. & Wolfendale A.W.: 1972, *J. Phys. A*, **5**, 1419