

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

# Studi di nuove miscele di gas per le MRPC del Progetto Extreme Energy Events

**Relatore:**  
Prof. Luisa Cifarelli

**Presentata da:**  
Federica Sibani

**Correlatore:**  
Dott. Marco Garbini

Anno Accademico 2022/2023

## Abstract

Il progetto Extreme Energy Events studia la componente muonica dei raggi cosmici attraverso una rete di telescopi traccianti basati su rivelatori a ionizzazione di gas chiamati Multigap Resistive Plate Chambers. Ad oggi ci sono 60 telescopi installati su tutto il territorio italiano, principalmente all'interno delle scuole superiori: il Progetto EEE ha una finalità di diffusione della cultura scientifica con un approccio innovativo in quanto gli studenti delle scuole sono coinvolti direttamente in tutte le fasi dell'esperimento, dalla costruzione dei rivelatori al loro monitoraggio e analisi dati.

A partire dal 2015 la Collaborazione EEE ha iniziato una transizione ecologica con lo studio di gas alternativi da utilizzare nei rivelatori per ridurre il più possibile, se non eliminare completamente, l'impatto ambientale dei telescopi. Nell'ambito del Progetto si stanno attualmente rimettendo in funzione alcuni telescopi operati con nuove miscele di gas a basso impatto ambientale e se ne stanno studiando le prestazioni.

In questo lavoro di tesi sono presentati alcuni risultati sperimentali di misure effettuate su un telescopio del Progetto EEE installato presso il Liceo Scientifico Statale Enrico Fermi di Bologna, che utilizza una miscela di tetrafluoropropene  $C_3H_2F_4$  e elio.

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>1 Raggi Cosmici</b>	<b>4</b>
1.1 Cenni storici . . . . .	4
1.2 Composizione e classificazione . . . . .	5
1.2.1 Raggi cosmici primari . . . . .	6
1.2.2 Raggi cosmici secondari . . . . .	8
1.2.3 Sciami di raggi cosmici . . . . .	9
1.3 Sorgenti e meccanismi di accelerazione . . . . .	12
<b>2 Il Progetto EEE</b>	<b>16</b>
2.1 Scopi del Progetto EEE . . . . .	16
2.1.1 PolarquEEEst . . . . .	18
2.2 Apparato sperimentale . . . . .	19
2.2.1 Il telescopio del Progetto EEE . . . . .	19
2.2.2 Sistema di read-out e acquisizione dati . . . . .	23
2.3 Miscela di gas "standard" e transizione ecologica . . . . .	24
2.4 Studi sulle nuove miscele . . . . .	25
<b>3 Procedure di ripartenza dei telescopi con miscela ecologia</b>	<b>29</b>
3.1 Test di tenuta . . . . .	30
3.2 Misure di efficienza . . . . .	32
3.2.1 Curve di efficienza per il telescopio BOLO-02 al Liceo Fermi di Bologna . . . . .	33
3.3 Stabilità . . . . .	34
3.3.1 Verifica della stabilità del telescopio BOLO-02 al Liceo Fermi di Bologna . . . . .	35
<b>Conclusioni</b>	<b>38</b>

# Introduzione

I raggi cosmici sono particelle subatomiche cariche provenienti dallo spazio, particolarmente interessanti perché dotate di uno spettro di energia molto ampio che va dai  $10^9$  ai  $10^{21}$  eV. Fin dalla loro scoperta agli inizi del '900 il loro studio ha permesso di scoprire anche altre numerose particelle e ha favorito lo sviluppo della fisica subnucleare contribuendo alla costruzione del Modello Standard; oggi la ricerca si focalizza sui raggi cosmici più energetici in quanto le loro sorgenti costituiscono esemplari naturali di acceleratori di particelle più energetici di quelli che siamo al momento in grado di costruire. Grazie al ruolo fondamentale che hanno avuto nello sviluppo delle moderne teorie relative alla fisica nucleare e subnucleare, i raggi cosmici sono stati scelti come strumento per attirare l'attenzione dei giovani sulla ricerca scientifica nell'ambito del Progetto *Extreme Energy Events - La Scienza nelle Scuole*. Tale Progetto si occupa dello studio di raggi cosmici attraverso la rivelazione a terra della componente muonica dei raggi ed è sviluppato in modo che i telescopi siano costruiti e mantenuti in funzionamento proprio da studenti di scuole superiori. I telescopi utilizzati sono costituiti da rivelatori gassosi, chiamati Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC), che usano una miscela binaria di gas per ottenere ottime prestazioni in termini di risoluzioni temporale e spaziale necessarie per gli scopi dell'esperimento. Da alcuni anni, tuttavia, il Progetto è in fase di aggiornamento e innovazione in quanto la Collaborazione EEE ha deciso di intraprendere una transizione a gas a minor impatto ambientale rispetto a quelli utilizzati originariamente. Nel primo capitolo della tesi saranno dunque presentati i raggi cosmici, dando particolare attenzione alla classificazione di tali particelle in base alle diverse energie con cui si presentano e ai processi che determinano lo sviluppo di sciame di raggi secondari in atmosfera permettendoci di rivelare le particelle muoniche al suolo. Nel secondo capitolo sarà invece presentato il Progetto *Extreme Energy Events*, e sarà descritta la struttura del telescopio tracciante per muoni utilizzato. In tale capitolo si discuterà la miscela di gas scelta alla nascita del Progetto ed i candidati per sostituirla, soffermandosi sulle misure necessarie per verificare la validità delle nuove proposte. Infine, nel terzo capitolo sarà descritto il procedimento di ripartenza dei telescopi con le nuove miscele ecologiche selezionate e saranno presentati alcuni risultati sulle prestazioni ottenute con la nuova miscela in un telescopio installato in una scuola dell'area metropolitana di Bologna.



# Capitolo 1

## Raggi Cosmici

### 1.1 Cenni storici

Con il termine *raggi cosmici* si indicano tutte le particelle e i nuclei atomici che, muovendosi a velocità prossime a quelle della luce, arrivano ad interagire con l'atmosfera terrestre con energie anche molto alte e raramente osservate in altri fenomeni naturali. Raggi, perché al momento della loro scoperta, agli inizi del ventesimo secolo, la ricerca sulla radiazione attribuiva questo termine al flusso di tutte le radiazioni ionizzanti, e cosmici, perché non hanno origine terrestre ma provengono dallo spazio circostante. Tale conclusione fu raggiunta già durante i primi decenni del 1900 grazie alla ricerca dei fisici Domenico Pacini e Victor Hess. Il primo dimostrò che le radiazioni naturali diminuivano nel passaggio dalla superficie di specchi d'acqua a pochi metri di profondità, mentre il secondo provò, con una serie di misure su pallone aerostatico, che il tasso di ionizzazione aumentava con l'altitudine e le radiazioni non potevano quindi avere origine terrestre; Hess osservò inoltre che tale tasso non diminuiva di notte né durante le eclissi solari e che non poteva quindi avere origine completamente solare, e, per tali scoperte, ricevette il premio Nobel nel 1936 [1].

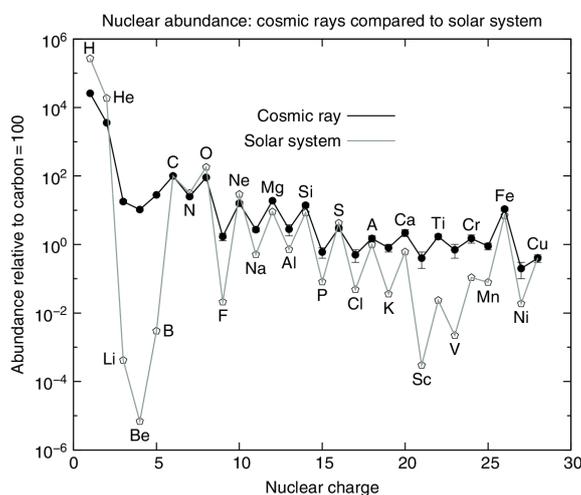
Negli anni successivi lo studio dei raggi cosmici si è fatto sempre più approfondito e sistematico. Infatti, attraversando l'atmosfera i raggi interagiscono con altre particelle in loro prossimità e vengono prodotte nuove particelle, proprio grazie allo studio di tali interazioni sono stati scoperti il positrone, il muone, il pione [2] e, in seguito, le particelle strane.

Ancora oggi sono argomento di grande interesse poiché, nonostante i numerosi studi, molti aspetti della loro natura, come le numerose possibili sorgenti o i processi attraverso i quali possono raggiungere energie così elevate, risultano non del tutto compresi.

## 1.2 Composizione e classificazione

Ad oggi distinguiamo i raggi cosmici in primari e secondari, intendendo con primari le particelle provenienti dallo spazio cosmico (si tratta per circa il 90% di protoni, 9% di particelle  $\alpha$  e per il restante di nuclei pesanti [2]) e con secondari i prodotti dei decadimenti deboli dei primari o delle loro interazioni con l'atmosfera terrestre. Questi possono essere a loro volta suddivisi in una componente *hard* (pari circa al 70%) costituita da muoni altamente energetici, e da una *soft* (pari circa al 30%) costituita da fotoni, elettroni ed in piccola parte da mesoni e nucleoni.

Tra gli elementi che costituiscono i raggi primari si trovano nuclei della maggior parte degli elementi della tavola periodica; è interessante comparare le abbondanze relative dei singoli nuclei nei raggi cosmici e nel sistema solare, dato che ciò può darci indicazioni sulla loro origine. Dalla Figura 1.1 notiamo prima di tutto che entrambe le concentrazioni risentono dell'effetto *odd-even* per cui i nuclei più abbondanti sono quelli con  $Z$  pari perché hanno legami interni più forti e sono quindi più stabili. Sono però anche visibili due chiare differenze: nei raggi cosmici sono presenti molti più nuclei con  $Z > 1$  che protoni rispetto alle stesse concentrazioni nel sistema solare e si ipotizza ciò sia dovuto al fatto che nelle sorgenti dei raggi cosmici sia effettivamente presente meno idrogeno o che questo elemento sia più difficile da ionizzare attraverso processi di accelerazione; inoltre, si ha un gruppo di elementi (Li, Be, B, Sc, Ti, Cr, Mn) presente in percentuali molto maggiori nei raggi cosmici rispetto al sistema solare. Questi elementi, molto dif-



**Figura 1.1:** Abbondanze relative dei nuclei che compongono i raggi cosmici misurate sulla Terra comparate con le abbondanze dei nuclei che compongono il sistema solare, tutte misurate in rapporto al carbonio [3].

facilmente prodotti da nucleosintesi stellare<sup>1</sup>, sono presenti nella radiazione cosmica in seguito a processi di spallazione<sup>2</sup> tra nuclei di massa maggiore. In particolare, si pensa siano prodotti dagli urti tra i raggi cosmici e il mezzo interstellare attraversato prima di giungere in prossimità della Terra. Misurando la quantità di questi elementi che arrivano sulla Terra, si può stimare la sezione d'urto per i processi di spallazione e, da questa, ricavare lo spessore medio del mezzo attraversato, ricavando una vita media dei raggi cosmici nella galassia di circa 3 milioni di anni [4].

Negli esperimenti più recenti lo studio della composizione chimica è stato approfondito cercando di capire come questa vari in funzione dell'energia del raggio primario. Tale informazione potrebbe facilitare la ricerca di sorgenti appropriate per le diverse categorie di raggi cosmici (illustrate con precisione nel prossimo paragrafo). Tuttavia, i modelli attuali per l'interazione dei raggi primari con l'atmosfera e per lo sviluppo degli sciami danno risultati non del tutto compatibili con i dati sperimentali raccolti fino ad ora, soprattutto quando si studiano i raggi cosmici di più alta energia. Per questo si stanno progettando alcuni telescopi per raggi cosmici di nuova generazione che si pensa forniranno un contributo importante nella determinazione della composizione in massa degli elementi [5].

### 1.2.1 Raggi cosmici primari

Possiamo classificare i raggi cosmici primari sulla base delle loro energie:

- High Energy Cosmic Rays (HECR):  $E \sim 10^9$  eV (1 GeV)
- Very High Energy Cosmic Rays (VHECR):  $E \sim 10^{12}$  eV
- Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR):  $E \sim 10^{15}$  eV
- Extremely High Energy Cosmic Rays (EHECR):  $E > 10^{15}$  eV

Per energie superiori ai  $10^{10}$  eV, per cui non prevale la modulazione solare<sup>3</sup>, il flusso dei raggi cosmici varia in funzione dell'energia secondo la legge

$$\Phi \propto E^{-\alpha} \tag{1.1}$$

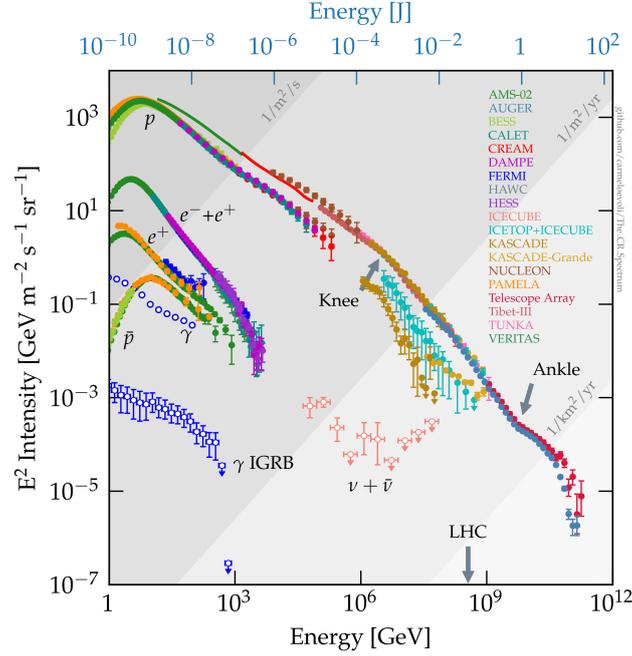
con  $\alpha$  indice spettrale.

---

<sup>1</sup>Insieme delle reazioni nucleari che avvengono nell'interno di una stella e risultano nella creazione di nuclei di alcuni elementi chimici.

<sup>2</sup>Processo attraverso il quale una grande quantità di nuclei leggeri sono liberati da un nucleo pesante in seguito ad una collisione con particelle ad alta energia.

<sup>3</sup>Il vento solare (plasma ionizzato) viene emesso ad intensità variabili in base allo stato di attività solare. I raggi cosmici che viaggiano nello spazio, per giungere alla Terra devono attraversarlo in direzione opposta al suo flusso perdendo parte della loro energia. L'influenza solare è tanto più rilevante quanto meno le particelle sono energetiche.



**Figura 1.2:** Spettro di energia dei raggi cosmici [6].

In Figura 1.2 è rappresentato questo andamento esponenziale inverso. In particolare, per energie fino ai  $10^{15}$  eV l'indice spettrale vale  $\alpha \sim 2.7$ , si ha poi un aumento di pendenza improvvisa in un'area chiamata ginocchio (Knee in Figura 1.2). Infatti, da questa porzione dello spettro fino a quella con raggi cosmici di energia fino ai  $10^{18}$  eV, l'indice spettrale assume un valore pari a circa 3. Per energie ancora maggiori si ha poi un ulteriore cambio di pendenza, con  $\alpha$  che torna a diminuire, e la zona in cui questo avviene è nota come caviglia (Ankle in Figura 1.2). Si pensa che la prima zona di transizione (ginocchio) segnali l'avvicinamento alla fine dello spettro dei raggi cosmici accelerati nella nostra galassia, mentre la seconda (caviglia) sia dovuta alla comparsa nello spettro dei raggi cosmici di origine extragalattica [3].

Il flusso dei raggi cosmici è modificato anche da fenomeni legati al campo magnetico terrestre. E' noto, infatti, grazie ai calcoli di Stoermer [4], che una particella di carica  $z|e|$  e quantità di moto (o impulso)  $p = mv$  in presenza di di un dipolo magnetico di momento  $M$  si muove su un'orbita circolare di raggio

$$r_s = \left[ \frac{\mu}{(4\pi)} \frac{Mz|e|}{p} \right]^{1/2} \quad (1.2)$$

dove  $\mu$  è la permeabilità magnetica dello spazio libero. Dunque, sostituendo i valori delle costanti e il momento di dipolo del campo magnetico terrestre, si ottiene il valore

minimo di rigidità magnetica ( $R = \frac{pc}{ze}$ ) affinché una particella raggiunga la Terra da est all'equatore magnetico, pari a  $R_{min} = 59.6 \text{ GV}$ . Sempre a Stoermer dobbiamo la formula generale per la rigidità magnetica minima dipendente anche da  $\theta$ , angolo zenitale di provenienza della particella,  $\lambda_B$ , latitudine magnetica, e  $\phi_B$ , angolo azimutale misurato in senso orario dalla direzione del polo sud magnetico. Questa si esprime come:

$$R_s(r, \lambda_B, \theta, \phi_B) = \left(\frac{M}{2r^2}\right) \frac{\cos(\lambda_B)^4}{\left[1 + (1 - \cos(\lambda_B))^3 \sin(\theta) \sin(\phi_B)\right]^{1/2}}^2 \quad (1.3)$$

dove  $r$  è la distanza dal centro del dipolo magnetico. Da ciò si ricava che il cut-off dell'impulso minimo per cui le particelle possono raggiungere la Terra è più alto per particelle che provengono dall'orizzonte est (per  $\sin(\theta) = +1$  ( $p)_{min} = 59.6 \text{ GeV}c^{-1}$ ) che per particelle provenienti da ovest (per  $\sin(\theta) = -1$  ( $p)_{min} = 10.2 \text{ GeV}c^{-1}$ ) e si ha dunque un fenomeno, chiamate effetto *est-ovest*, di anisotropia, per cui a qualsiasi latitudine, benché all'equatore l'effetto sia più evidente, si rivelano più raggi cosmici provenienti da ovest che da est. L'importanza di tale risultato, osservato sperimentalmente poco dopo il 1930 da Bruno Rossi e negli anni seguenti da altri gruppi indipendenti, risiede nel fatto che la sovrabbondanza di raggi cosmici provenienti da ovest ha permesso di provare che questi fossero costituiti da particelle cariche positivamente [1].

Anche la latitudine, per effetto della forza di Lorentz, influenza i raggi cosmici. In particolare, dato che all'equatore le linee di campo magnetico sono parallele alla superficie terrestre, si ha un effetto di sbarramento per cui le particelle a bassa energia sono respinte o deviate, mentre ai poli, dove sono parallele alla direzione di moto delle particelle, lo sbarramento è minimo. Questo effetto è visibile solo sulle particelle di bassa energia mentre quelle ad alta energia, che sono più pericolose ma anche più rare, riescono comunque a penetrare l'atmosfera anche in prossimità dell'equatore. L'effetto complessivo che si osserva dunque per l'*effetto latitudine* è che l'intensità dei raggi rivelati aumenta dall'equatore verso i poli con una variazione dal 15 fino al 30% [7, 8].

## 1.2.2 Raggi cosmici secondari

Come è stato accennato, quando i raggi cosmici primari (per lo più protoni o nuclei leggeri) penetrano l'atmosfera interagiscono con i nucleoni degli atomi e delle molecole che la costituiscono producendo particelle secondarie. Queste sono principalmente mesoni  $\pi$  che si presentano in tre possibili stati di carica:  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ . Poiché la profondità di interazione<sup>4</sup> totale dell'atmosfera terrestre vale  $X = 1030 \text{ g/cm}^{-2}$  e il libero cammino medio specifico<sup>5</sup> di assorbimento dei protoni è circa pari a  $100 \text{ g/cm}^{-2}$ , questo primo

<sup>4</sup>La profondità di interazione è pari alla pressione atmosferica divisa per l'accelerazione di gravità  $g$ .

<sup>5</sup>Il libero cammino medio specifico è pari al libero cammino medio delle particelle diviso per la densità del mezzo.

processo avviene principalmente nella stratosfera. Inoltre, poiché i pioni hanno vita media piuttosto breve (circa  $20 \text{ ns}$ ), questi decadono a loro volta in muoni e neutrini prima di raggiungere il suolo.

Si hanno due principali decadimenti: il primo riguarda la produzione di muoni a partire da pioni carichi, questi costituiscono la componente *hard* della radiazione; il secondo invece è il decadimento dei pioni neutri in fotoni, che costituiscono invece la componente *soft*.

I pioni carichi decadono secondo:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \qquad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Per pioni a basse energie questo decadimento avviene in volo ancora nella parte più alta dell'atmosfera, mentre quando l'ordine di grandezza delle energie si avvicina ai TeV, dato che la probabilità di decadimento è inversamente proporzionale all'energia, i pioni tendono a essere coinvolti in reazioni nucleari invece di decadere. In entrambi i casi, anche i muoni decadono in elettroni e positroni con vita media  $\tau \approx 2.2 \mu\text{s}$ . Tuttavia, per il fenomeno della dilatazione dei tempi derivato dalle trasformazioni di Lorentz, la loro vita media nel sistema di riferimento della Terra è pari a  $\Delta t = \gamma\tau$  e quindi si può ricavare che la loro lunghezza di decadimento per energie superiori ai  $3 \text{ GeV}$  è circa pari a  $20 \text{ km}$  da:

$$l = \gamma\beta c\Delta t = \frac{E_\mu}{m_\mu c^2} \beta c\Delta t$$

con  $\beta \approx c$  e  $m_\mu \approx 0.105 \text{ GeV}/c^2$ . Dunque i muoni riescono a raggiungere il suolo e, avendo bassa probabilità di interazione con la materia, addirittura a proseguire sottoterra. Data questa alta capacità di penetrazione vengono detti componente *hard* della radiazione.

I pioni neutri decadono invece in due fotoni secondo

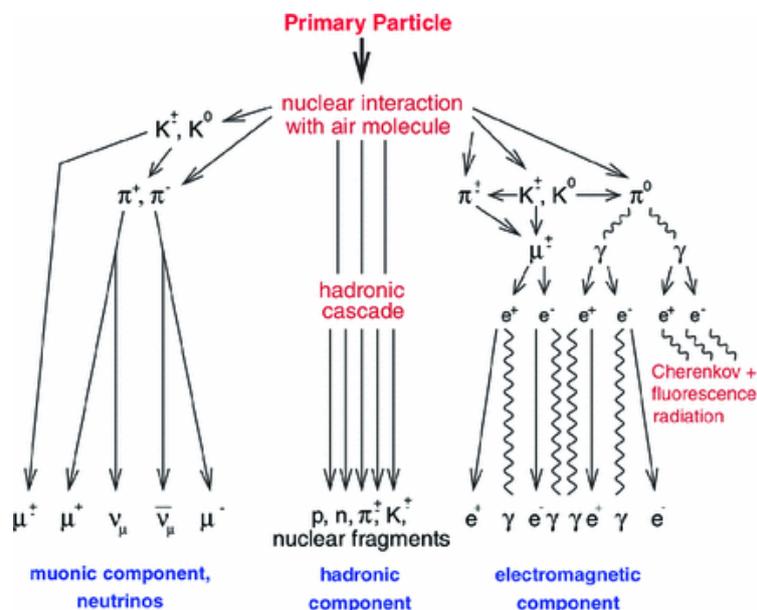
$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

I fotoni liberati hanno però lunghezza di assorbimento molto breve rispetto alla lunghezza di scala atmosferica, e dunque sono assorbiti molto velocemente dall'atmosfera e possono penetrare molto meno in profondità della componente muonica. Sono quindi detti componente *soft* della radiazione [4].

### 1.2.3 Sciame di raggi cosmici

Un raggio cosmico primario ad alta energia, interagendo con elementi dell'atmosfera, attraverso una combinazione di interazioni a catena, produzioni, assorbimenti e decadimenti spontanei, produce, quindi, una cascata di particelle secondarie, detta sciame

atmosferico (*shower*). Le particelle prodotte possono essere distinte in tre tipologie principali e in base a queste si identificano tre componenti principali dello sciame: elettromagnetica, muonica e adronica (Figura 1.3).



**Figura 1.3:** Rappresentazione schematica delle componenti e dello sviluppo di uno sciame atmosferico [9].

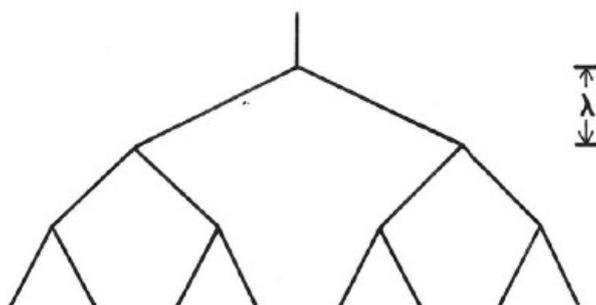
In particolare, si ha una particella adronica primaria (protone o nucleo leggero) che interagendo può generare pioni carichi e neutri. I  $\pi^0$  decadono immediatamente in due fotoni che alimentano la cascata elettromagnetica generando elettroni e positroni attraverso la produzione di coppie e la radiazione di bremsstrahlung. I  $\pi^+$  e  $\pi^-$ , invece, inizialmente interagiscono tra loro e con le altre particelle presenti nell'atmosfera producendo mesoni, anche di altro tipo (kaoni), e nuovi nucleoni, che vanno a rialimentare la componente adronica. Per questo effetto a cascata, ogni volta che ciò avviene circa  $\frac{1}{3}$  dell'energia disponibile in precedenza viene ceduta alla componente elettromagnetica dello sciame. L'energia dei mesoni prodotti dal nucleo primario diminuisce quindi progressivamente fino a che i pioni e kaoni hanno energie troppo basse per consentire nuove interazioni tali da generare nuovi adroni e dunque decadono invece in muoni e neutrini muonici.

L'effetto complessivo è che, all'aumentare della profondità dell'atmosfera, la componente adronica dello sciame riceve sempre meno contributi fino a divenire trascurabile e anche l'energia che era stata ceduta alla componente elettromagnetica viene trasferita poiché sui fotoni iniziano a dominare gli effetti di perdita dell'energia (ionizzazione) rispetto a quelli di produzione di coppie e di radiazione di bremsstrahlung. Nella bassa atmosfera,

dunque, lo sciame è quasi interamente costituito dalla componente muonica, poiché i muoni hanno vita media sufficientemente lunga per raggiungere il suolo e interagiscono raramente con altre particelle [10].

Per descrivere uno sciame ci si concentra sul modo in cui questo si propaga orizzontalmente e verticalmente nell'atmosfera; in particolare, se si definisce *asse dello sciame* la direzione di arrivo del raggio primario, che può essere ricavata misurando le coincidenze di particelle secondarie tra di loro vicine, si possono fare considerazioni su due importanti caratteristiche:

- Sviluppo laterale: misura della densità di particelle in funzione della distanza dall'asse dello sciame (è massimo in prossimità dell'asse dello sciame e diminuisce allontanandosi da esso)
- Sviluppo longitudinale: misura della quantità di particelle che costituiscono lo sciame ad una particolare densità atmosferica (aumenta fino ad un valore massimo ad una certa altezza in atmosfera ma poi torna a decrescere per prevalenza dei fenomeni di assorbimento.)



**Figura 1.4:** Semplice modello di branching per uno sciame [3].

L'andamento dello sviluppo longitudinale può essere descritto in modo approssimato dal modello di *branching* di Heitler. Questo modello fu introdotto da Heitler inizialmente per descrivere l'andamento della sola cascata elettromagnetica, ma nella sua forma basilare può essere applicato anche alle cascate adroniche [3]. Il modello generico si basa sull'ipotesi che, come mostrato in Figura 1.4, ogni linea rappresenti una particella che dopo una lunghezza di radiazione  $\lambda$  si divida in due per un qualsiasi processo di radiazione e ciascuno dei prodotti abbia metà dell'energia della particella iniziale. In questo modo, dopo ogni lunghezza di interazione il numero di particelle raddoppia e l'energia posseduta da ciascuna corrisponde ad una uguale frazione dell'energia iniziale. Se la particella che da origine allo sciame ha energia  $E_0$ , dopo  $n = \frac{X}{\lambda}$  divisioni, dove  $X$  è l'altezza

dell'atmosfera, si possono quindi esprimere il numero di segmenti e l'energia dello sciame secondo:

$$N(X) = 2^{\frac{X}{\lambda}} \qquad E(X) = \frac{E_0}{N(X)}.$$

Per quanto detto in precedenza, questo processo continua finché non si raggiunge una certa energia critica  $E_c$  al di sotto della quale non si possono più avere interazioni che rialimentino la componente adronica. Si può allora ricavare l'altezza dell'atmosfera per cui si ha il massimo dello sviluppo longitudinale di uno sciame procedendo in ordine inverso con le equazioni appena viste:

$$N(X_{max}) = \frac{E_0}{E_c} \qquad X_{max} = \lambda \frac{\ln(\frac{E_0}{E_c})}{\ln 2}.$$

Estendendo questo semplice modello con la generalizzazione di Matthews [5], ovvero considerando i decadimenti e gli scambi di energia tra le diverse particelle che compongono lo sciame, si possono ottenere buone approssimazioni della profondità a cui lo sciame ha massimo sviluppo e quanti muoni sono già presenti a questa altezza. Inoltre si può calcolare una soluzione generale secondo cui la quantità di muoni a diverse profondità dipende, secondo una legge di potenza, dall'energia del raggio primario.

### 1.3 Sorgenti e meccanismi di accelerazione

Come anticipato in precedenza, studiare la composizione dei raggi cosmici primari (Figura 1.1) ci permette di formulare ipotesi sulla loro provenienza e, ad esempio, osservando le differenze tra i componenti dei raggi cosmici e del sistema solare, si è giustificata l'ipotesi che almeno in parte queste radiazioni provengano da zone esterne alla nostra galassia. Tuttavia, avendo sorgenti molto lontane, prima di raggiungere la Terra i raggi cosmici sono diffusi e deviati molte volte e per questo la radiazione che giunge al nostro pianeta è completamente isotropa. Dunque, risulta impossibile cercare in modo diretto le sorgenti studiando la traiettoria con cui la radiazione giunge sulla Terra. Una delle caratteristiche su cui si può fare riferimento è, allora, la scala di alte energie con cui si presentano. Infatti, le particelle più energetiche tendono ad essere meno deviate dai campi magnetici galattici ed extragalattici e dunque lo studio della loro direzione d'arrivo potrebbe essere più rilevante per la ricerca delle zone dell'universo da cui provengono. Inoltre, solo alcuni processi astrofisici possono accelerare particelle alle intensità degli UHECR, quindi si può separare il problema nello studio teorico di meccanismi in grado di accelerare particelle coerenti con il flusso energetico osservato e nella successiva ricerca di oggetti cosmici con energie in grado di poterli accelerare. Tuttavia, anche se attualmente sono state avanzate numerose ipotesi per diversi processi di accelerazione, risulta difficile discriminarne la legittimità o escluderne alcune, poiché, a causa del basso flusso,

lo spettro delle energie più alte è quello su cui si hanno meno informazioni. Attualmente si ritiene dunque che i raggi cosmici possano essere accelerati con modalità diverse in diversi oggetti o siti dell'universo e sono ancora in atto numerose ricerche con l'obiettivo di restringere il campo.

In generale, i meccanismi di accelerazione possibili sono di due tipi: *top-down* e *bottom-up*. Il caso *top-down* riguarda la produzione di raggi cosmici come prodotti secondari del decadimento di particelle pesanti formate nell'universo primordiale, mentre nei processi *bottom-up* i protoni e i nuclei ad alte energie che costituiscono i raggi cosmici primari sono accelerati in regioni in cui sono presenti campi magnetici molto intensi. Ad oggi, i meccanismi del secondo tipo sono preferiti a quelli del primo, in quanto l'esperimento Auger ha dimostrato che è piuttosto improbabile che processi di tipo *top-down* determinino la produzione di sciami di raggi cosmici con energie superiori ai  $10^{19}eV$  [11].

Lo studio della provenienza dei raggi cosmici si è dunque orientato negli ultimi anni verso la ricerca di oggetti astrofisici in grado di accelerare i raggi cosmici fino a spiegare la parte dello spettro a *ultra-high energy*. In particolare, perché un sito possa essere effettivamente una sorgente di questo tipo di raggi cosmici deve soddisfare una serie di criteri [12]:

- Deve avere una geometria tale da garantire che le particelle accelerate possano essere trattenute in esso fino al raggiungimento di energie abbastanza alte. Questa situazione impone un limite sull'energia massima che può essere fornita al raggio primario che fu teorizzato e quantificato da Hillas. Il criterio di Hillas afferma che  $E_{max} = \beta e Z B R$  e dipende dall'intensità del campo magnetico  $B$  della sorgente, dalle sue dimensioni lineari  $R$  e dal rapporto  $\beta$  tra la velocità di *shock* della sorgente e la velocità della luce; inoltre, la dipendenza da  $Z$  suggerisce che un atomo completamente ionizzato con alto numero atomico possa raggiungere un'energia totale molto maggiore di quella ottenibile da un protone [10].
- L'energia guadagnata dalle particelle accelerate non può essere inferiore all'energia persa per radiazione o per interazione con altre particelle.
- La densità e l'intensità di energia della sorgente devono essere tali da garantire che il numero di particelle emesse possano spiegare il flusso di UHECR rilevato sulla Terra.
- Il flusso di particelle ad alte energie può essere accompagnato da neutrini, fotoni o altri raggi a basse energie ma il flusso di questi ultimi deve essere inferiore di quello osservato per gli UHECR.

Attualmente, si ritiene che gli UHECR provengano in parte da sorgenti galattiche come resti di supernove, microquasar e centri galattici (raggi cosmici con energie inferiori a

quelle del ginocchio) e in parte da sorgenti extragalattiche quali *Active Galactic Nuclei* (AGN) o *Gamma-Ray Bursts* (GRB)(raggi cosmici con energie superiori a quelle del ginocchio). In ciascuno si ipotizza che le particelle siano accelerate tramite meccanismi diversi:

- Resti di supernove

In seguito all'esplosione di una supernova si genera un involucro gassoso, chiamato resto di supernova, costituito dai materiali che appartenevano agli strati più esterni della stella esplosa. Questi oggetti sono considerati tra i più probabili acceleratori di raggi cosmici nella nostra galassia in quanto sedi di campi magnetici molto intensi in grado di liberare particelle ad alte energie tramite processi di *shock acceleration*. Questi avvengono quando particelle inizialmente diffuse isotropicamente nel mezzo interstellare attraversano un fronte di perturbazione causato dall'espansione dei resti di supernova, guadagnando energia a causa della collisione elastica con il fronte stesso e il processo di accelerazione continua finché le particelle sono trasportate lontano dalla zona di perturbazione. Questo processo, noto come meccanismo di Fermi al primo ordine, è attualmente piuttosto accreditato poiché sufficientemente veloce da non permettere alle particelle di perdere parte dell'energia guadagnata mentre il meccanismo è ancora in azione e poiché prevede un valore per l'indice spettrale  $\alpha$  pari a quello misurato [10].

- Microquasar

I microquasar sono sistemi binari nella nostra galassia in grado di generare raggi molto collimati, detti *jet*, di plasma relativistico. Questi sono proposti come ulteriori candidati per l'emissione di raggi cosmici di energie inferiori a quelle del ginocchio in quanto i jet di plasma potrebbero produrre neutroni relativistici che, una volta liberati al di fuori del microquasar, potrebbero decadere in protoni ed elettroni in grado di proseguire nel mezzo interstellare come raggi cosmici [13].

- Sagittarius A\*

Sagittarius A\* (Sgr A\*) è il buco nero supermassivo che si trova nella regione del centro galattico della Via Lattea. Essendo un nucleo galattico attivo a bassa luminosità, Sgr A\* non ha un flusso di accrescimento efficiente per radiazione, ovvero una buona parte dell'energia gravitazionale del gas che lo accresce non viene emessa come radiazione (infatti Sgr A\* è solo una debole sorgente per raggi X) ma viene convertita invece in altre forme di energia, che potrebbero permettere un'accelerazione stocastica di protoni che vengono poi liberati nello spazio interstellare [14].

- Active Galactic Nuclei (AGN)

Un nucleo galattico attivo è una regione compatta e generalmente centrale di una galassia che emette radiazione non stellare dovuta all'accrescimento di gas e polveri

attorno al buco nero supermassivo centrale rifornito da gas e polveri provenienti dal nucleo della galassia, talvolta può anche essere costituito da jet di materiale relativistico alimentati dal buco nero stesso. Gli AGN caratterizzati da jet, in quanto sorgenti di raggi gamma e neutrini ad alte energie, sono anche possibili candidati come fonti dei raggi cosmici alle energie più elevate, come quelle superiori alla caviglia dello spettro.

- Gamma-Ray Bursts (GRB)

Questi sono tra i fenomeni elettromagnetici più energetici mai osservati, consistono in potenti lampi di fotoni che in genere durano dai pochi millisecondi a qualche minuto. Data l'alta energia del fenomeno, sarebbero buoni candidati per la produzione di raggi cosmici extragalattici, tuttavia, dato che non si sono mai osservati in coincidenza con un'emissione di neutrini, che ci si aspetterebbe per un evento di produzione di UHECR, si stanno studiando casi particolari che possano risultare ragionevoli in questi limiti. Un esempio di fenomeno che sembrerebbe spiegare lo spettro dei raggi cosmici con energie sopra la caviglia e i dati osservati per i neutrini sono i GRB a bassa luminosità [15].

Per raccogliere nuovi dati sui raggi cosmici che ci permettano di migliorare le nostre conoscenze ed effettuare ipotesi sempre più realistiche e precise circa la loro origine, si sfruttano diversi tipi di rivelatori. Alcuni progetti sfruttano rivelatori in orbita per studiare direttamente i raggi primari, questi tuttavia sono efficaci solo per particelle con energie inferiori ai  $10^{14}$  GeV, in quanto il flusso di particelle più energetiche è troppo basso per essere analizzato efficacemente. Per lo studio delle alte energie risultano quindi molto importanti i telescopi al suolo, che possono essere di due tipi: rivelatori di radiazione, che misurano la radiazione elettromagnetica emessa durante lo sviluppo dello sciame in atmosfera, o rivelatori di particelle secondarie sviluppate dallo sciame di un UHECR, sviluppati su un'ampia area di territorio così da poter raccogliere un grande campione di dati.

Dal prossimo capitolo verrà discusso un progetto di quest'ultimo tipo sviluppato sul territorio italiano che si occupa della ricerca sull'origine dei raggi cosmici coniugandola ad un'opera di coinvolgimento di giovani studenti con l'obiettivo di farli appassionare al mondo della ricerca e della scienza.

# Capitolo 2

## Il Progetto EEE

Il Progetto *Extreme Energy Events - La Scienza nelle Scuole*, EEE per brevità, consiste in una attività di ricerca coordinata dal Centro Fermi (Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi") e dall'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) sull'origine dei raggi cosmici. In particolare, il Progetto si occupa di studiare gli sciame estesi di raggi cosmici rivelando a terra la componente muonica dei raggi secondari attraverso telescopi costituiti da rivelatori a ionizzazione di gas detti *Multigap Resistive Plate Chambers* (MRPC) distribuiti su tutto il territorio italiano.

Il Progetto EEE è particolarmente innovativo poiché, oltre a raccogliere dati utili per studiare i molti aspetti ancora incerti riguardo alla natura dei raggi cosmici, è strutturato in modo da coinvolgere fortemente studenti e docenti delle scuole secondarie; infatti, sono gli stessi studenti degli istituti aderenti ad EEE ad occuparsi della costruzione dei telescopi e supervisionarne il corretto funzionamento e l'acquisizione dati una volta che i rivelatori sono installati nelle rispettive scuole [16].

### 2.1 Scopi del Progetto EEE

Il Progetto si occupa dello studio dei raggi cosmici attraverso la rivelazione della componente muonica che arriva al suolo in seguito allo sviluppo dello sciame in alta atmosfera, ed ha inoltre lo scopo di diffondere la cultura scientifica tra i giovani tramite il loro diretto coinvolgimento in un programma di ricerca.

La missione affidata al Progetto è dunque, secondo le parole dell'ideatore Antonio Zichichi, quella di *"portare la Scienza nel cuore dei giovani"* [17]. A tal fine i ragazzi sono inizialmente introdotti alle sfide della fisica moderna attraverso alcune lezioni e masterclass su argomenti che spaziano fuori dal normale programma previsto per le scuole superiori, e allo stesso tempo sono coinvolti concretamente nelle operazioni di acquisizione dati in un esperimento di fisica dei raggi cosmici. Gli studenti stessi si recano al CERN di Ginevra per occuparsi della costruzione delle camere MRPC del telescopio sotto la



**Figura 2.1:** Distribuzione sul territorio italiano degli istituti aderenti al Progetto.

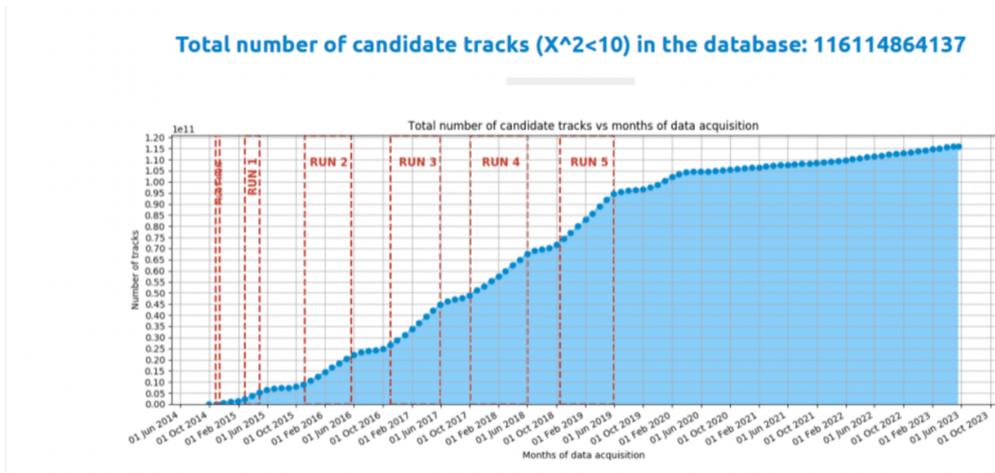
guida di ricercatori appartenenti alla Collaborazione EEE, e, una volta che il rivelatore è installato nel loro istituto, si occupano di garantire che i telescopi siano costantemente operativi. Infine, gli studenti sono resi partecipi dell'analisi dei dati raccolti e dei risultati ottenuti e sono invitati a conferenze e stage presso centri di ricerca nazionali [17].

Se la fase iniziale del Progetto ha portato nel 2005 alla costruzione di 7 telescopi per altrettante scuole superiori, ad oggi sul territorio italiano ne sono distribuiti circa 60 in istituti scolastici superiori o in laboratori di ricerca e circa altrettanti istituti partecipano ad EEE pur non essendo ancora dotati di telescopi (la loro distribuzione è mostrata in Figura 2.1). Dal 2014, poi, sono iniziati periodi di acquisizione dati coordinata, detti run coordinati, durante i quali i telescopi della rete sono accesi e funzionanti a piena efficienza contemporaneamente. Ciò ha permesso di acquisire più di 100 miliardi di tracce di muoni, come mostrato in Figura 2.2. Grazie alla grande quantità di dati raccolti durante tali periodi è stato possibile effettuare diversi studi, come ad esempio [18]:

- Variazione del flusso in funzione di fenomeni ambientali locali (ad esempio per variazioni di pressione, temperatura e altitudine) [19];
- Ricerca di anisotropie nei raggi cosmici a basse energie (sub-TeV) per studiare l'effetto di campi magnetici solari e terrestri [20];
- Studio della modulazione solare, specialmente per quello che riguarda l'effetto Forbush, ovvero la diminuzione nell'intensità dei raggi cosmici rilevata nei periodi di intensa attività solare [21];

- Analisi approfondita di sciami locali attraverso le correlazioni rilevate tra telescopi posizionati nella stessa città e studio di possibili correlazioni a grande distanza tra tutti i telescopi della rete [22];

Il Progetto è inoltre ancora in espansione, con l'obiettivo di aumentare il numero di scuole coinvolte e telescopi distribuiti sul territorio, ed è in atto un'operazione di aggiornamento dell'apparato in uso come sarà illustrato nei prossimi paragrafi.



**Figura 2.2:** Numero totale di candidate tracce di muoni acquisite e ricostruite nell'ambito del Progetto EEE dal 2014 [23].

### 2.1.1 PolarquEEEst

Il Progetto EEE ha anche avuto uno speciale sviluppo con l'esperimento PolarquEEEst. Questo ha permesso lo studio della variazione del flusso di raggi cosmici in funzione della latitudine. Tale studio è effettuato con telescopi basati su piani di scintillatori letti da fotomoltiplicatori al silicio. Uno di questi rivelatori è stato installato a bordo del battello *Nanug* che nel 2018 ha circumnavigato l'arcipelago delle isole Svalbard, situate a meno di 1000 km dal Polo Nord, per misurare il flusso di muoni dall'Islanda fino a latitudini prossime agli 82° N. I dati acquisiti sono stati analizzati e messi in relazione con quelli ottenuti da due rivelatori identici che nello stesso periodo erano installati rispettivamente in una scuola superiore italiana e in una norvegese [24]. Ulteriori misure di precisione della variazione del flusso di muoni cosmici a latitudini minori sono state successivamente ottenute trasportando su strada in varie tappe uno dei rivelatori dalla Sicilia (Lampedusa) alla Germania (Hannover) [8]. Infine nel 2019 tre rivelatori sono stati installati presso la base scientifica internazionale di Ny Alesund e da quel momento hanno contribuito a monitorare e studiare il flusso dei raggi cosmici a latitudini estreme.

## 2.2 Apparato sperimentale

Dato che i telescopi EEE devono essere usati in un progetto su larga scala e operati da studenti è stato importante progettarli tenendo conto di alcune prerogative; l'apparato utilizzato doveva essere prima di tutto semplice e sicuro, ma anche resistente ed in grado di funzionare a lungo richiedendo minimi interventi di manutenzione. Non ultimo, doveva essere in grado di garantire un'ampia copertura mantenendo i costi limitati. Inoltre, per permettere di ricostruire con precisione le traiettorie delle particelle rivelate l'apparato doveva possedere una buona risoluzione spazio-temporale.

Un candidato conforme a questi requisiti è stato identificato in una particolare tipologia di rivelatori a ionizzazione di gas, ovvero il rivelatore multigap a piani paralleli resistivi (*Multigap Resistive Plate Chamber*, MRPC) progettato per il sistema di misura del tempo di volo delle particelle (*Time Of Flight*, TOF) dell'esperimento ALICE a LHC [25].

### 2.2.1 Il telescopio del Progetto EEE

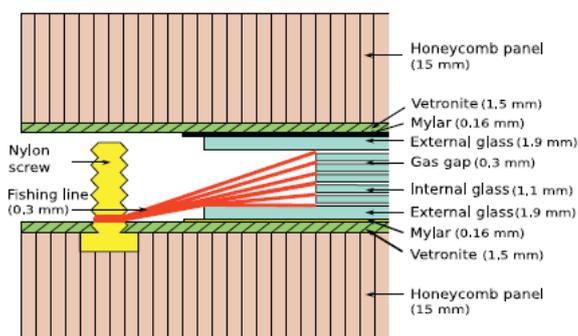


**Figura 2.3:** Telescopio del Progetto costituito da tre camere di tipo MRPC.

#### Il rivelatore

Il telescopio (Figura 2.3) è costituito da tre camere MRPC (Figura 2.4), ciascuna costituita da due pannelli di vetro di dimensione  $160\text{ cm} \times 85\text{ cm} \times 1.9\text{ mm}$  trattati con un rivestimento resistivo; i due pannelli sono collegati all'alta tensione costituendo il catodo e l'anodo del rivelatore. Lo spazio tra i due è a sua volta diviso in sei gap grazie alla frapposizione tra anodo e catodo di cinque lastre di vetro di dimensione inferiore ( $158\text{ cm} \times 82\text{ cm} \times 1.1\text{ mm}$ ) tenute separate da una trama di filo da pesca. Ognuno

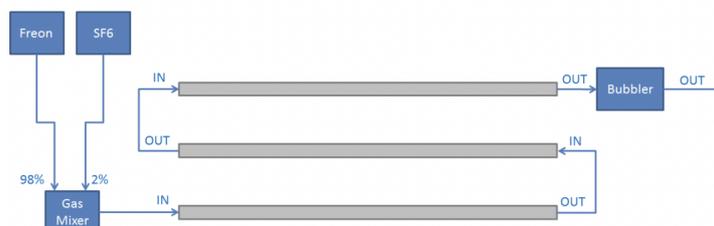
di questi sei gap fondamentali per il funzionamento della camera, ha uno spessore di  $300\ \mu\text{m}$  ( $250\ \mu\text{m}$  nei rivelatori costruiti dopo il 2015) ed è riempito di una miscela di gas. L'anodo e il catodo, inoltre, sono in contatto, sulla superficie esterna, con un pannello di vetronite su cui sono distribuite 24 strisce (*strip*) in rame larghe  $2.5\ \text{cm}$  che raccolgono il segnale prodotto dal passaggio delle particelle all'interno del rivelatore. L'intera struttura è poi montata su due pannelli in materiale composito (honeycomb) per garantirne la rigidità e robustezza e infine racchiusa in una scatola a tenuta stagna in alluminio di  $2\ \text{m} \times 1\ \text{m} \times 0.05\ \text{m}$ .



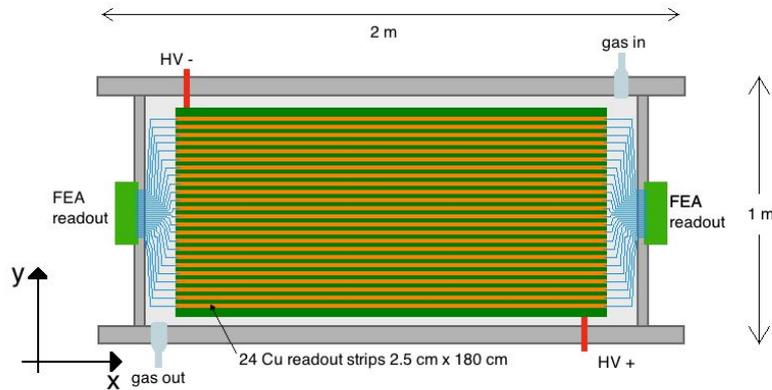
**Figura 2.4:** Vista trasversale schematica di una MRPC a sei gap [26].

Ciascuna scatola possiede, sui suoi lati lunghi, i connettori per l'ingresso e l'uscita della miscela di gas e dei connettori per l'alta tensione. Il voltaggio necessario al funzionamento della camera è fornito attraverso dei convertitori DC/DC alimentati a basse tensioni ma in grado di produrre fino a  $10\ \text{kV}$ . Complessivamente quindi, le MRPC sono alimentate con una tensione di  $18 - 20\ \text{kV}$  e funzionano con una miscela di tetrafluoroetano ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ ) al 98% e di esafluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ) al 2%, che continuamente circola nelle camere ad un flusso di  $1\ \text{l/h}$  grazie ad un miscelatore installato nelle immediate vicinanze del telescopio (come mostrato in Figura 2.5).

Infine, su entrambi i lati corti di ogni camera sono posizionate le schede di front-end (FEA) per la lettura del segnale raccolto dalle strip (Figura 2.6).



**Figura 2.5:** Rappresentazione schematica del sistema di flussaggio dei gas.



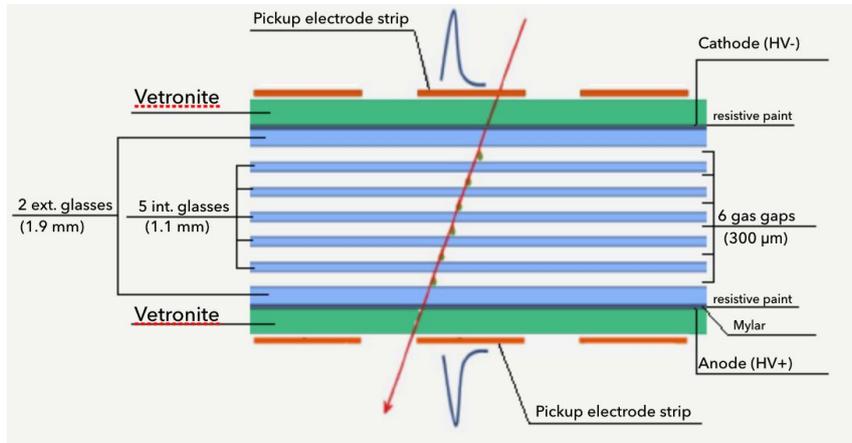
**Figura 2.6:** Vista dall'alto della struttura di una camera MRPC nella quale sono visibili le strip di rame, le schede di front-end FEA, le valvole di ingresso e uscita dei gas e i connettori per l'alta tensione [27].

### Principio di funzionamento

Il rivelatore sfrutta il processo della ionizzazione, ovvero il fenomeno per cui quando le particelle passano attraverso un gas tendono a strappare elettroni agli atomi che vengono a trovarsi sul loro percorso. In particolare, quando un muone attraversa i gap delle camere contenenti gas, ionizza gli atomi che incontra generando coppie elettrone-ione positivo. Se il gas è immerso in un campo elettrico sufficientemente intenso, gli elettroni sono poi a loro volta accelerati e avviano un processo di ionizzazione secondaria innescando una reazione a valanga per cui la carica che si genera all'interno del volume di gas è molto maggiore di quella che si otterrebbe dal solo processo di ionizzazione primaria.

Considerando i primi rivelatori a sfruttare tale fenomeno (come ad esempio i contatori Geiger) si può osservare come le esigenze sperimentali abbiano portato allo sviluppo di strumenti sempre più performanti. Un miglioramento dei rivelatori caratterizzati da un volume di gas racchiuso tra elettrodi a facce piane parallele è stato il passaggio all'utilizzo, per la costruzione degli elettrodi stessi, di materiali non conduttori ma ad alta resistività. In materiali con tali caratteristiche, infatti, lo sviluppo della valanga secondaria è limitato ad una regione dell'elettrodo localizzata e per un tempo relativamente breve; il resto del rivelatore rimane in questo modo sensibile al passaggio di altre particelle cariche e il rivelatore nel suo complesso è in grado di rivelare flussi di particelle più elevati rispetto ai dispositivi precedenti.

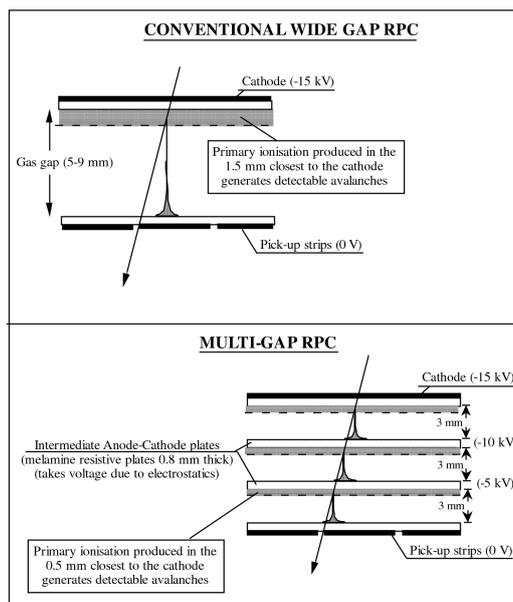
Un ulteriore sviluppo di tali rivelatori, noti come Resistive Plate Chambers (RPC) ha portato alla costruzione delle Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC).



**Figura 2.7:** Rappresentazione schematica della struttura interna di una camera MRPC e del suo principio di funzionamento [27].

Nella MRPC (Figura 2.7), che mantiene i vantaggi di una RPC migliorandone le prestazioni, i piani intermedi resistivi nel gas gap sono elettricamente flottanti e si portano alla giusta tensione inizialmente per effetto elettrostatico e poi grazie al flusso di elettroni e ioni positivi; l'alta resistività li rende poi trasparenti ai segnali generati dalle valanghe. Inoltre, dato che il segnale in una RPC è generato dalla moltiplicazione a valanga nel gap, e il numero di elettroni liberati dipende dalla posizione in cui si ha il cluster di ionizzazione primaria, la variazione di tale posizione provoca una dispersione nel tempo di formazione del segnale (*time jitter*). Dunque, in una RPC le fluttuazioni statistiche legate al processo di creazione di una valanga sono più influenti che in una MRPC in cui il segnale è determinato dalla media delle diverse valanghe che si sviluppano nei diversi gap. In questo modo la suddivisione in sotto gap in cui avviene la ionizzazione primaria migliora la risoluzione temporale poiché tale processo deve avvenire in un minor spazio, riducendo quindi il *time jitter*. In Figura 2.8 sono mostrati schematicamente il confronto tra una RPC e una MRPC e lo sviluppo delle valanghe di ionizzazione nei due rivelatori. Nel processo di moltiplicazione a valanga in ciascun gap della MRPC (Figura 2.7), lo spostamento delle cariche verso l'anodo e il catodo induce il segnale sulle strip che risulta, per quanto detto, dato dalla somma analogica dei segnali nei singoli gap. I rivelatori MRPC sono operati in *avalanche mode*, cioè lo sviluppo della moltiplicazione a valanga è limitato e si evita lo sviluppo degli *streamer* (scariche dovute ad un eccessivo campo di carica spaziale nelle valanghe che diventa paragonabile al campo applicato tra gli elettrodi). Dunque, l'utilizzo delle camere a molti gap consente di avere (idealmente) nei vari gap più segnali di prima ionizzazione, a partire dai quali si genera la ionizzazione secondaria ed eventualmente la valanga il cui sviluppo incontrollato è evitato sia dall'utilizzo di una miscela opportuna sia, come evidenziato, dalla presenza dei piani resistivi intermedi.

Le coordinate del punto di passaggio del muone si ottengono dai segnali sulle strip. Con riferimento alla Figura 2.6 la coordinata  $y$  della traccia è data dalla strip su cui il segnale è indotto, mentre la coordinata  $x$  si ottiene dalla differenza dei tempi di arrivo del segnale alle due estremità della strip stessa. La risoluzione spaziale per le MRPC del Progetto EEE è di circa ( $1 \text{ cm}^2$ ) e la risoluzione temporale di circa ( $200 \text{ ps}$ ) [26, 27].



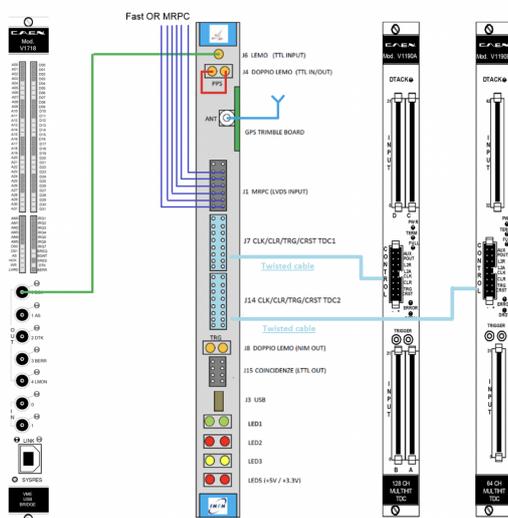
**Figura 2.8:** Rappresentazione schematica del principio di funzionamento di un rivelatore MRPC rispetto ad un RPC.

## 2.2.2 Sistema di read-out e acquisizione dati

Il segnale proveniente dalla strip è processato dalle schede di front-end (FEA) poste all'estremità corta della camera MRPC (Figura 2.6). Ciascuna scheda permette la discriminazione dei segnali e la loro digitalizzazione (standard LVDS, *Low Voltage Differential Signaling*) in caso superino una soglia di alcune centinaia di mV.

Nel caso in cui almeno una delle strip abbia un segnale maggiore della soglia la FEA genera un segnale di OR che è inviato alla scheda di *trigger* ospitata in un apposito crate VME che contiene vari moduli di elettronica oltre a questa scheda. Se un muone attraversa i 3 rivelatori del telescopio la scheda di *trigger* riceverà 6 segnali di OR generati dalle 6 FEA in coincidenza e genererà il segnale di trigger per l'acquisizione dati. Tale segnale permette a due moduli *Time-to-Digital-Converter* (TDC) di salvare le informazioni delle strip in cui è stato indotto il segnale e i tempi di arrivo dei segnali stessi alle FEA. Tali informazioni sono (come detto in precedenza) utilizzate per determinare le coordinate spaziali  $x$  e  $y$  dell'evento. In particolare si utilizza un TDC dotato di 128 canali per le

misure relative alle camere Top e Bottom. Per ogni MRPC sono necessari 48 canali per immagazzinare le informazioni delle strip: si hanno 24 strip lette alle due estremità delle camere che sono convenzionalmente chiamate Right e Left. Per immagazzinare anche le informazioni relative alla camera centrale si utilizza un ulteriore TDC da 64 canali. Infine nel crate VME è alloggiato un Bridge VME USB che garantisce la comunicazione tra il crate VME ed il computer su cui è installato un programma di acquisizione, sviluppato in ambiente LABVIEW. I telescopi della rete EEE sono inoltre tra loro sincronizzati temporalmente grazie all'utilizzo di un ricevitore GPS installato nella scheda di trigger. Il sistema di readout dei telescopi è sintetizzato in Figura 2.9 [27].



**Figura 2.9:** Schematizzazione delle schede che compongono il sistema di readout.

## 2.3 Miscela di gas "standard" e transizione ecologica

La miscela di gas è stata scelta per garantire una buona efficienza dei rivelatori in *avalanche mode*. A tale scopo i gas scelti dovevano essere facilmente ionizzabili, ma non in grado di portare il sistema in un regime di scariche a causa della formazione di valanghe incontrollate. Per questo motivo si è scelta una miscela di due gas: uno con densità di ionizzazione primaria per unità di lunghezza piuttosto alta, che permettesse l'avvio della valanga, e l'altro abbastanza elettronegativo da assorbire parte degli elettroni liberati per limitare lo sviluppo incontrollato della valanga e la comparsa di streamer. La scelta è dunque ricaduta su una miscela al 98% di tetrafluoroetano ( $C_2H_2F_4$ ) e al 2% di esafluoruro di zolfo ( $SF_6$ ).

Nel 2015 è entrato in vigore un nuovo regolamento dell'Unione Europea relativo all'utilizzo dei gas fluorurati che limita l'utilizzo e la vendita di gas contribuenti all'effetto serra in ambito commerciale. Il freon (tetrafluoroetano) e l'esafluoruro di zolfo sono gas con rispettivamente  $GWP = 1430$  e  $GWP = 23900$ , dove con  $GWP$  si indica il *Global Warming Power*, che è misura del contributo di un gas all'effetto serra, normalizzato su un uguale quantità di  $CO_2$ , e rientrano quindi nei gas oggetto del nuovo regolamento. Benché il documento europeo non regolamenti l'uso di tali gas in esperimenti di ricerca scientifica, la loro produzione e distribuzione è inevitabilmente destinata a diminuire drasticamente a causa dei divieti di utilizzo in altri ambiti. Per questo motivo si stanno cercando soluzioni per diminuire la quantità di tali gas utilizzata nei telescopi: dapprima si è cercato di ridurre il flussaggio del gas e di costruire un'unità per il ricircolo del gas già utilizzato e, più recentemente, si è deciso di ritirare definitivamente la miscela standard a favore di una nuova combinazione di gas a ridotto impatto ambientale.

La miscela sostitutiva è stata cercata il più possibile simile alla miscela originale per poter essere compatibile con la strumentazione e l'elettronica già in uso: deve comunque essere una miscela binaria così da poter usare lo stesso miscelatore e deve garantire le stesse prestazioni per i valori di tensione compatibili se non uguali a quelli utilizzati precedentemente con la miscela standard. In particolare, la nuova miscela deve permettere di raggiungere efficienze prossime al 100% e non peggiorare la stabilità di funzionamento e le risoluzioni dei telescopi.

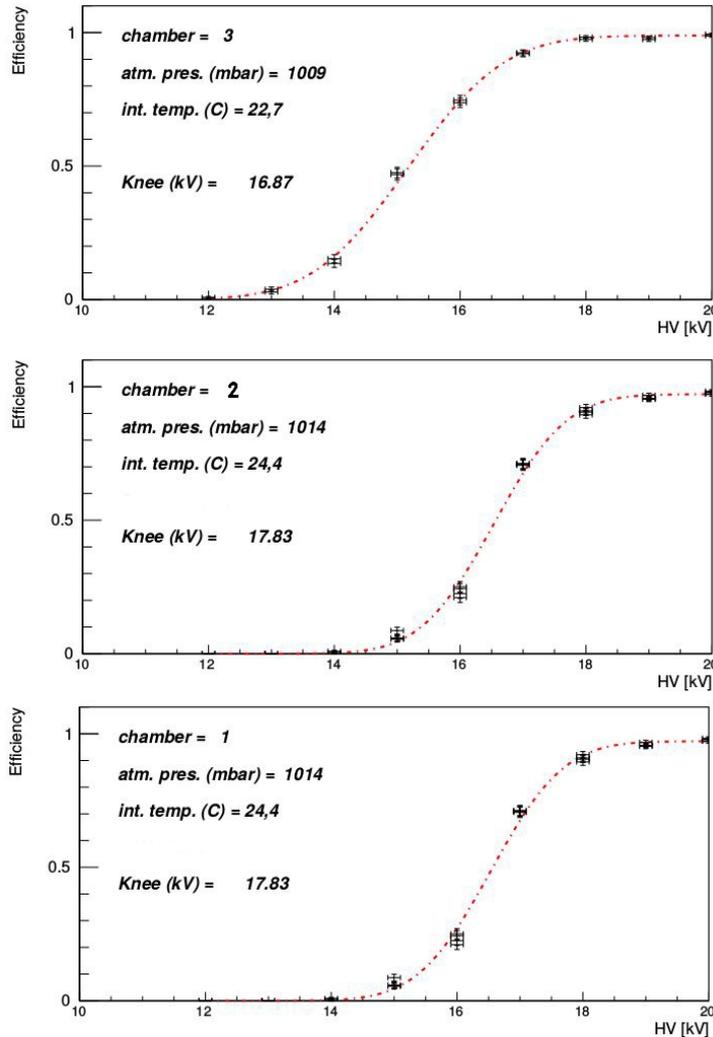
Le due miscele attualmente in esame prevedono l'utilizzo di tetrafluoropropene  $C_3H_2F_4$  (in forma HFO-1234ze), abbastanza simile al freon ma con  $GWP = 6$ , miscelata a  $He$  o  $CO_2$ . Il ruolo di questi ultimi è prevalentemente quello di ridurre la pressione parziale della parte di gas "attiva" nel processo di ionizzazione così da abbassare la tensione di lavoro per il rivelatore. Infatti, per una miscela composta interamente da  $C_3H_2F_4$  sarebbe necessario operare il rivelatore ad una tensione superiore ai 21  $kV$ , valore molto alto e al di là del limite di funzionamento dei convertitori DC/DC attualmente in uso.

## 2.4 Studi sulle nuove miscele

Gli studi sulle nuove miscele proposte si affidano in prima istanza allo studio delle efficienze in funzione della tensione applicata agli elettrodi delle MRPC; la curva di efficienza di questi rivelatori presenta infatti un andamento crescente con la tensione applicata fino al raggiungimento di una regione di plateau (Figura 2.10).

Poiché le MRPC flussate con la miscela originale raggiungono tipicamente valori di efficienza prossimi al 100% per tensioni applicate di 18  $kV$ , la prima fase dello studio delle nuove miscele si pone l'obiettivo di garantire la possibilità di raggiungere alte efficienze per valori di tensione applicata compatibili con quelli precedenti.

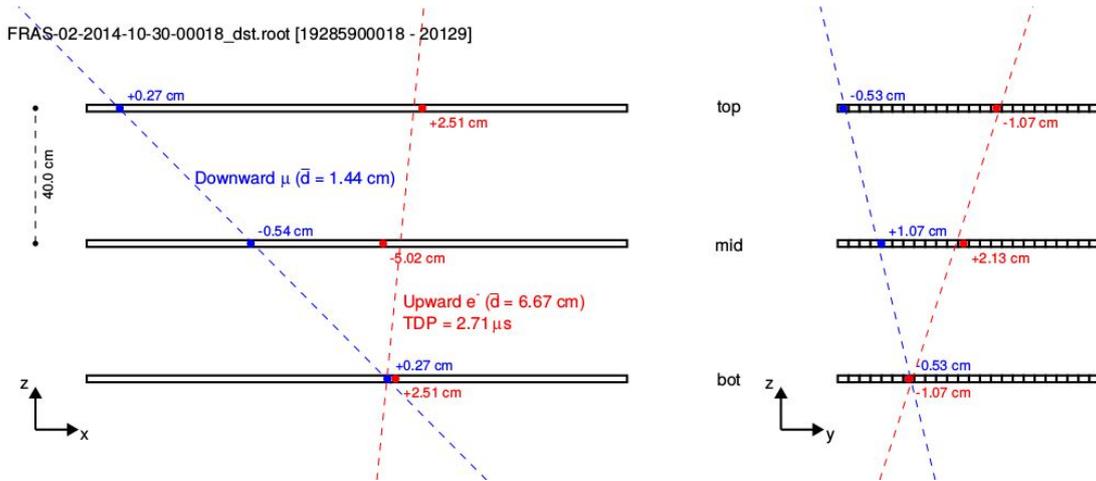
Un altro importante aspetto da verificare è la stabilità delle prestazioni del telescopio, che devono mantenersi ottimali anche nel lungo termine.



**Figura 2.10:** Esempi di curve di efficienza in funzione della tensione applicata per un telescopio del Progetto EEE con miscela standard. In ciascuna figura si può vedere che tutte le camere MRPC hanno un plateau  $\approx 95\%$ , per voltaggi superiori ai 18 kV [28].

### Misure di efficienza

Dato che la logica di *trigger* seleziona i segnali rivelati da tutte e tre le camere, l'efficienza totale del telescopio si ricava da  $\epsilon_{telescopio} = \epsilon_1 \times \epsilon_2 \times \epsilon_3$ . L'effettiva rivelazione del passaggio di un muone è quindi fortemente legata all'efficienza di ciascuna singola camera che deve essere la più alta possibile. Le prime analisi delle efficienze del telescopio con la nuova miscela sono state effettuate mantenendo due camere a miscela originale "standard" e operando solo la terza con le nuove possibili combinazioni di gas. Programmando la logica di *trigger* per selezionare le coincidenze tra le camere a miscela "standard" e richiedendo come condizioni di accettabilità del segnale una velocità della



**Figura 2.11:** Interpolazione (o fit) di segnali rivelati dalle camere per ricostruire una traccia. Grazie alla coordinata temporale assegnata a ciascuno si può determinare la direzione di arrivo della particella [28].

particella  $0.85 < \beta < 1.15$  e un angolo polare di incidenza  $\theta < 25^\circ$ , si è estrapolato attraverso un codice di ricostruzione la posizione in cui la particella dovrebbe essere rilevata nella camera sotto studio.

Normalmente, il codice di ricostruzione che analizza i dati acquisiti dai telescopi è ottimizzato in modo da effettuare un fit lineare di tutti i possibili *cluster* (insieme di segnali di incidenza di una particella raggruppati perché vicini tra loro o rilevati nello stesso momento) e calcola il  $\chi^2$  corrispondente. Le tracce sono poi definite iterativamente selezionando i candidati con  $\chi^2$  minore fino a che tutti i *cluster* sono stati attribuiti ad una traccia; alcuni esempi di tracce ricostruite sono visibili in Figura 2.11. Per le misure di efficienza, invece, il programma esegue il fit solo tra le camere di riferimento per il trigger ed in seguito estrapola la posizione in cui la traccia scelta dovrebbe essere rivelata nella camera in esame; quest'ultima si considera "efficiente" se viene effettivamente trovato un cluster in un raggio di 10 cm dal punto di intercetta estrapolato.

Dato che le variazioni di temperatura e pressione influenzano il libero cammino medio delle particelle del gas nel rivelatore vanno anche ad influire sulle sue prestazioni ed è spesso utile studiare l'efficienza in funzione di una tensione efficace, calcolabile come:

$$HV_{eff} = HV \frac{p_0}{p} \frac{T}{T_0} \quad (2.1)$$

dove  $p_0$  e  $T_0$  sono pressione e temperatura standard (in seguito considereremo  $p_0 = 1000 \text{ mbar}$  e  $T_0 = 298.15 \text{ K}$ ).

## **Stabilità**

Poiché è importante che i rivelatori mantengano le loro buone prestazioni nel lungo termine per garantire la possibilità di avviare nuovi run coordinati in futuro, è necessario verificare che continuando ad utilizzare le nuove miscele le prestazioni dei telescopi si mantengano stabili.

Per verificare la stabilità di operazione del telescopio si monitorano alcune variabili nel tempo. In particolare, nei nostri studi prenderemo in considerazione il rate di eventi acquisiti e il rate di tracce ricostruite con un  $\chi^2 < 10$ .

## Capitolo 3

# Procedure di ripartenza dei telescopi con miscela ecologia

Il processo di transizione alle nuove miscele ecologiche si presenta attualmente come l'obiettivo di maggior interesse per il Progetto. Dopo un periodo di inattività in cui le operazioni di acquisizione dati sono state forzatamente interrotte dalla pandemia di COVID-19, infatti, le operazioni di ripartenza sono state strutturate in modo da favorire la definitiva transizione ecologica dei telescopi [29]. In particolare, già dal 2021 sono stati rimessi in funzione quattro telescopi (a Bologna, Pisa, Cosenza e al CERN di Ginevra) per completare gli studi sulle prestazioni delle nuove miscele già avviati [30]. Oggi sono quindici le stazioni già rientrate in funzione o per cui si sta verificando lo stato della strumentazione in modo da iniziare l'acquisizione nel corso del prossimo anno scolastico con una nuova miscela di HFO-1234ze, ossia di tetrafluoropropene ( $C_3H_4F_2$ ), abbinato in diverse proporzioni a elio o anidride carbonica.

L'operazione di ripartenza per una stazione si articola in due fasi fondamentali: dapprima occorre verificare lo stato del telescopio ed il funzionamento dei vari componenti, ponendo grande attenzione alla verifica dell'assenza di perdite di gas nelle camere; la seconda fase consiste invece nella vera e propria messa in funzione del telescopio e misura delle curve di efficienza con la nuova miscela.

Come esempio di applicazione della procedura riportiamo le misure effettuate per la ripartenza del telescopio installato presso il Liceo Scientifico Statale "E. Fermi" di Bologna (denominato BOLO-02) mostrato in Figura 3.1. Ricordiamo che tale telescopio è stato fermo da aprile 2019 sino a febbraio 2023; prima dell'emergenza legata alla pandemia da COVID-19 il telescopio era stato spento per iniziare una serie di controlli sulle apparecchiature e sulla tenuta delle camere. I controlli sono stati dunque ripetuti in questa fase di ripartenza.



(a)



(b)

**Figura 3.1:** Liceo Enrico Fermi di Bologna (a), dove è installato uno dei telescopi del Progetto EEE (b).

### 3.1 Test di tenuta

La verifica dell'assenza di perdite nei telescopi del Progetto è una parte fondamentale del processo di ripartenza. Un'eventuale perdita, infatti, comporterebbe un funzionamento non ottimale dei rivelatori. Ridurre le perdite delle MRPC è inoltre un passo fondamentale per introdurre in futuro un sistema di ricircolo del gas, che richiede appunto che il sistema sia accuratamente sigillato. La verifica della tenuta è effettuata grazie ad un'opportuna procedura sviluppata dalla Collaborazione EEE.

Il test di tenuta consiste nell'iniettare un volume noto di gas nelle camere e nella misura delle conseguenti variazioni di pressione all'interno dei rivelatori; l'inserimento di un volume di gas in un sistema chiuso comporta un aumento di pressione: se il sistema è privo di perdite, ci si aspetta che tale pressione, compatibilmente con le variazioni di temperatura e pressione esterne al sistema, rimanga stabile. Se da tale misura si osserva un calo in pressione si può dedurre che parte del gas sia fuoriuscito dalle camere.

Per ogni MRPC occorre in primo luogo ottenere la curva di calibrazione per dedurre il rapporto tra il volume di gas immesso e l'aumento di pressione che ne deriva; la relazione è ottenuta eseguendo un fit con una polinomiale di secondo grado. Una volta che si è iniettata una quantità sufficiente di gas nelle camere, è necessario misurare periodicamente la pressione interna e ricavare, grazie alla curva di calibrazione, il volume in eccesso ancora presente. Tale valore deve essere corretto per variazioni di temperatura secondo, in prima approssimazione, la legge dei gas perfetti

$$\Delta V_{corr} = \Delta V + \frac{N_{mol}R}{P}\Delta T$$

dove  $N_{mol}$  è il numero di moli e  $R$  la costante universale dei gas.

Infine, occorre verificare le variazioni di volume in funzione del tempo per cui ci si attende un andamento esponenziale secondo:

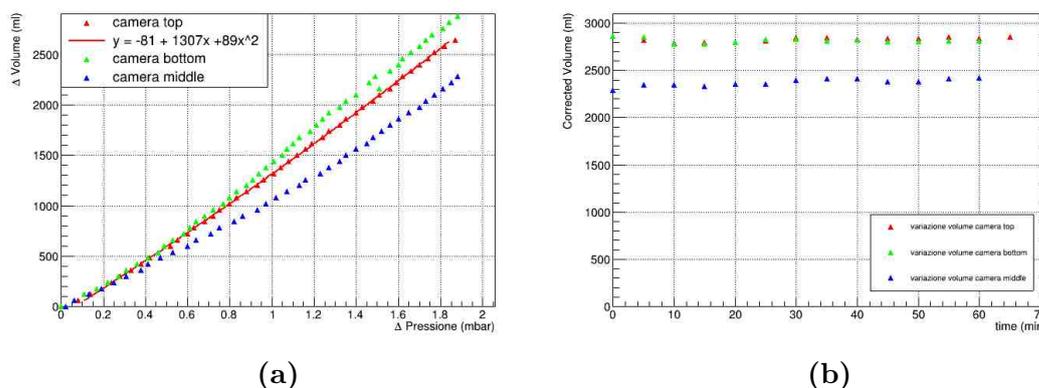
$$V(t) = V_0 e^{-kT}$$

dove  $k$  è un parametro che può essere estratto con un fit per la curva  $V(t)$ . Si ottiene quindi il rate di perdita valutando la derivata di  $V(t)$  alla sovrappressione a cui lavorano normalmente le camere, ovvero per  $t'|P = 1 \text{ mbar}$

$$\frac{dV}{dt} = -kV_0e^{-kt'}$$

Per la ottimale funzionalità dei rivelatori è richiesto che le perdite siano inferiori a  $0.1 \text{ l/h}$ .

In Figura 3.2(a) è mostrata la curva di calibrazione, ovvero la variazione in pressione causata dal volume di gas immesso, di tutte le camere del telescopio BOLO-02; per ogni camera è stato effettuato il fit polinomiale (in figura è mostrato il risultato ottenuto per la camera Top a titolo esemplificativo). In Tabella 3.1 e Figura 3.2(b) è poi mostrato come il volume all'interno delle camere non sia diminuito sensibilmente e, in particolare, poiché le perdite di ogni camera si sono rivelate inferiori al valore limite, si è potuto procedere con le successive operazioni di rimessa in funzione del telescopio. La variazione in volume negativa riscontrata per le camere Top e Middle è dovuta alle variazioni nelle condizioni di pressione e temperatura nella stanza del telescopio.



**Figura 3.2:** Curve di calibrazione per le tre camere del telescopio BOLO-02 (a) e variazione del volume nelle camere dovuta alle perdite (b).

camera in esame	perdita (l/h)
Bottom	$0.05 \pm 0.04$
Top	$-0.03 \pm 0.03$
Middle	$-0.13 \pm 0.04$

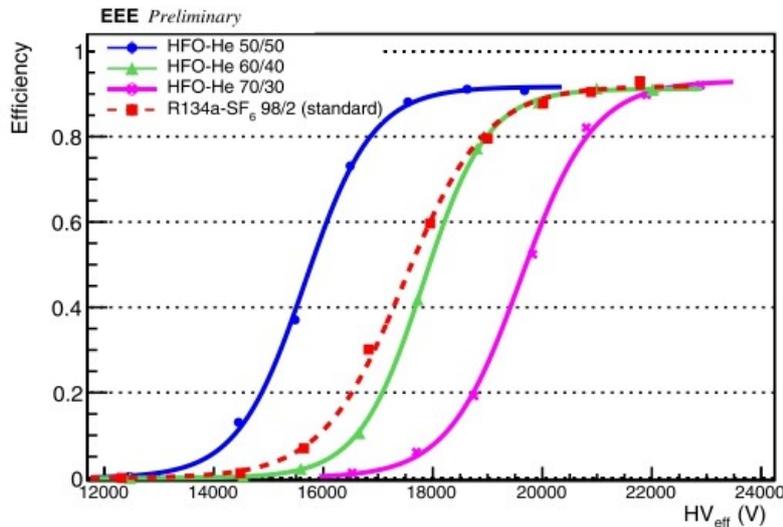
**Tabella 3.1:** Variazione in volume per ogni camera di BOLO-02 ottenuta misurando la pressione e applicando la curva di calibrazione.

## 3.2 Misure di efficienza

Dopo aver verificato che le MRPC siano a tenuta e che tutti gli altri elementi hardware non abbiano risentito del lungo periodo di stop delle operazioni, le procedure di ripartenza sono proseguite con l'utilizzo dei nuovi gas ecologici. In particolare, per il telescopio BOLO-02 la miscela utilizzata è costituita da tetrafluoropropene ( $C_3H_2F_4$ ) e elio. Primo step della fase di ripartenza con la nuova miscela è la misura di curve di efficienza in funzione della tensione applicata in modo da determinare il valore della tensione applicata agli elettrodi per il quale si raggiunge il plateau di massima efficienza. Come anticipato nel capitolo precedente, tali misure sono effettuate acquisendo dati con la scheda di trigger impostata sulla selezione di coincidenze di segnali tra due camere e verificando se tale traccia è rivelata anche dalla camera sotto esame, ovvero se si ha un segnale in un'area prossima a quella stimata per il passaggio della particella tramite interpolazione dei segnali selezionati dal trigger.

Si effettuano misure diverse a diverse tensioni applicate alla camera sotto test; la scansione in tensione parte dal valore di  $15\text{ kV}$  fino a raggiungere la massima tensione erogabile dai DC/DC converter che è compresa tra i  $19\text{ kV}$  e i  $20\text{ kV}$ .

Dalle analisi effettuate sui primi telescopi rimessi in funzione si è osservato che la nuova miscela di  $C_3H_2F_4$  e  $He$  garantisce un'efficienza di funzionamento del telescopio prossima al 100% e paragonabile a quella ottenuta con la miscela standard (Figura 3.3).

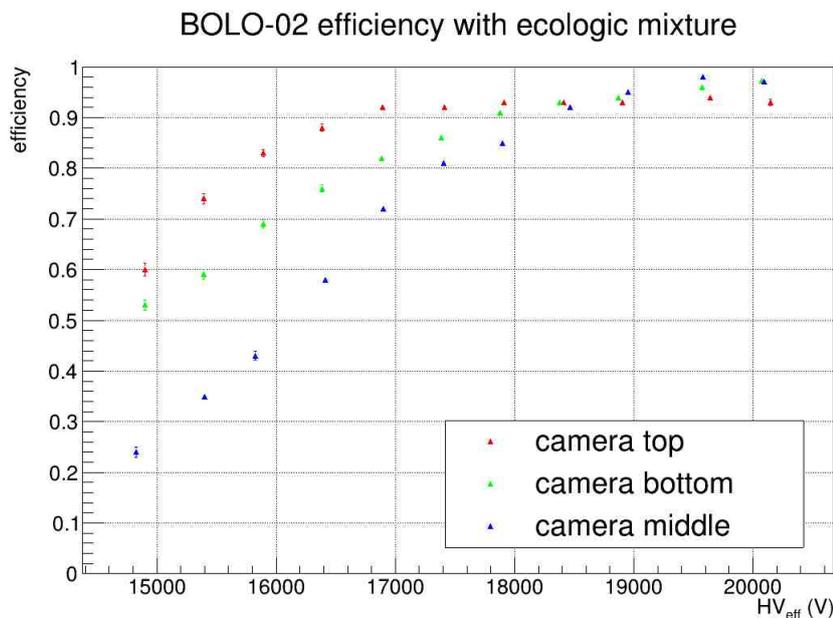


**Figura 3.3:** Curve di efficienza in funzione della tensione efficace ottenute in studi preliminari con diverse miscele di HFO-R1234ze (tetrafluoropropene) ed  $He$  confrontate con la miscela standard di freon HFC-R134a (tetrafluoroetano) e  $SF_6$  [31].

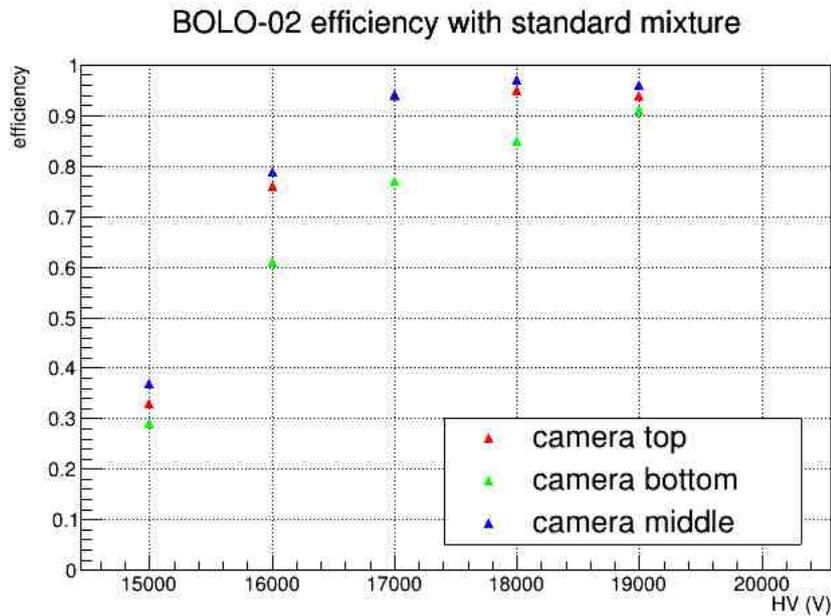
### 3.2.1 Curve di efficienza per il telescopio BOLO-02 al Liceo Fermi di Bologna

Il telescopio installato presso il Liceo Enrico Fermi a Bologna è stato rimesso in funzione a fine maggio 2023 flussando tutte le camere con una miscela al 50% di  $C_3H_2F_4$  e 50% di elio.

Le curve di efficienza misurate in fase di ripartenza suggeriscono, come già osservato da risultati preliminari per altri telescopi [31], che la nuova miscela ecologica costituisca un ottimo candidato per la sostituzione della miscela standard. Infatti, facendo riferimento alle Figure 3.4 e 3.5 si possono confrontare le curve ottenute in questo telescopio con le due miscele e si osserva come le prestazioni in termini di efficienza siano praticamente invariate.



**Figura 3.4:** Curve di efficienza in funzione della tensione per le tre camere del telescopio BOLO-02 ottenute nel giugno 2023 flussando con la nuova miscela di  $He$  e  $C_3H_2F_4$ . Per ogni punto sono riportati gli errori statistici ma in quanto molto ridotti risultano quasi completamente coperti dagli indicatori.

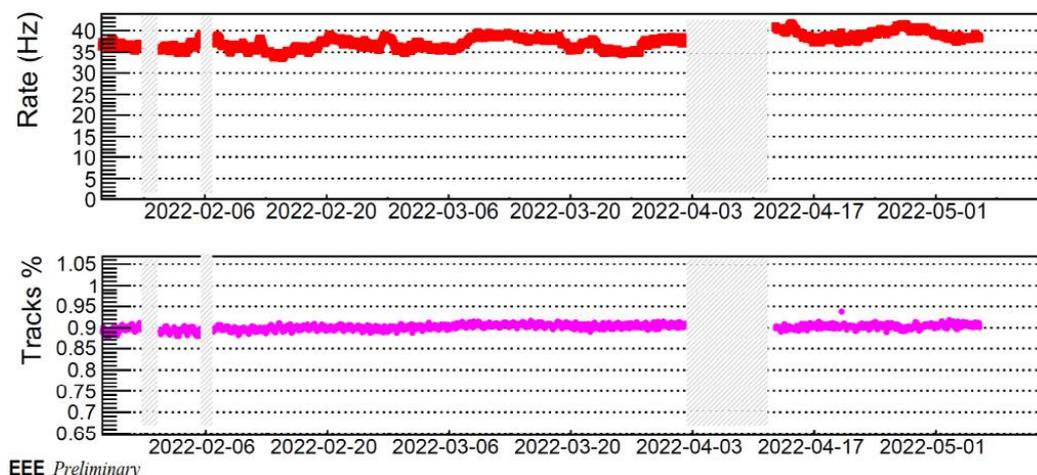


**Figura 3.5:** Curve originali con miscela standard ottenute in seguito all’installazione del telescopio nel 2007.

### 3.3 Stabilità

Nell’ambito del Progetto EEE è stato sviluppato un sistema di monitoraggio online della rete che permette in tempo reale di controllare lo stato di funzionamento di ciascun telescopio [23]. Oltre ad un’interfaccia intuitiva basata sui colori (verde, giallo e rosso) che permette di individuare immediatamente i telescopi funzionanti o con problemi, dalla stessa pagina è possibile controllare alcuni parametri fisici tramite una serie di grafici di *Data Quality Monitor*. Con il passaggio alla nuova miscela è importante monitorare nuovamente queste variabili per verificare che i telescopi continuino a lavorare nello stesso regime di stabilità della miscela originale.

I parametri più significativi nello studio del funzionamento delle camere sono quelli legati al rate di acquisizione: primo fra tutti il rate di acquisizione medio di segnali; da questo si ricava il rate degli *hit*, ovvero dei segnali che fanno attivare la scheda di trigger, ed infine il rate delle tracce effettive ricostruite interpolando i segnali sulle tre camere. Anche in questo caso, le analisi preliminari svolte sul telescopio PISA-01, ubicato presso la sezione INFN di Pisa, hanno validato la scelta della nuova miscela evidenziando la stabilità del rate durante i mesi di presa dati, come riportato in Figura 3.6.



**Figura 3.6:** Evoluzione in un periodo di tre mesi del rate di acquisizione del telescopio PISA-01 (in alto) e percentuale di tracce ricostruite con  $\chi^2 < 10$  (in basso). Le interruzioni nel grafico dei dati sono dovute a periodi di misure di efficienza o a operazioni di manutenzione sul telescopio.

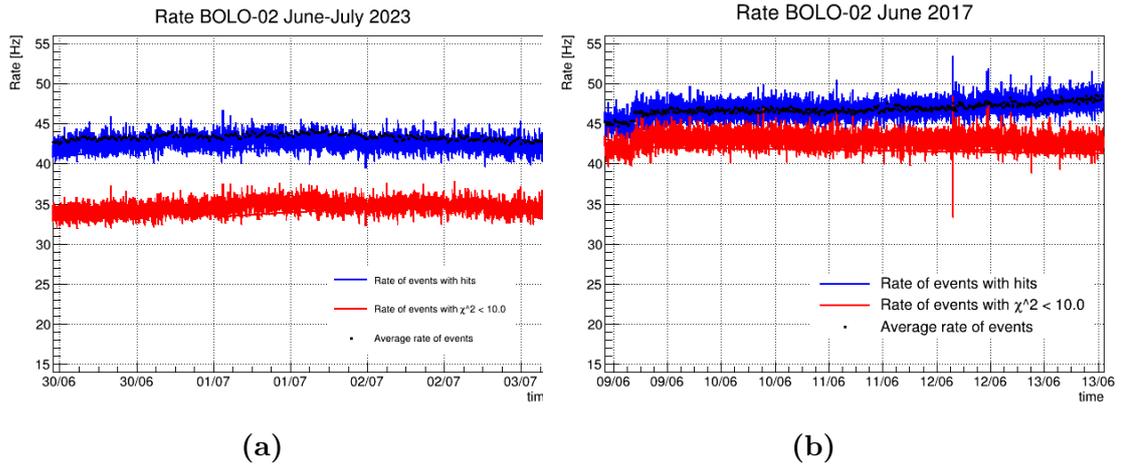
Un altro parametro che può aiutare in questa fase di riavvio dei telescopi a monitorarne il corretto funzionamento è, ad esempio, la molteplicità di *hit* per ciascuna MRPC. Tale parametro permette di valutare se, in presenza di una traccia ionizzante, il numero di strip interessato dall'induzione del segnale sia paragonabile a quello ottenuto con miscela standard (1.5 strip di media) o sia diverso. Tale variabile può in alcuni casi infatti influire sul funzionamento degli algoritmi di clusterizzazione delle strip e di ricostruzione delle tracce originariamente ottimizzati sulla base dei risultati ottenuti con la miscela standard.

### 3.3.1 Verifica della stabilità del telescopio BOLO-02 al Liceo Fermi di Bologna

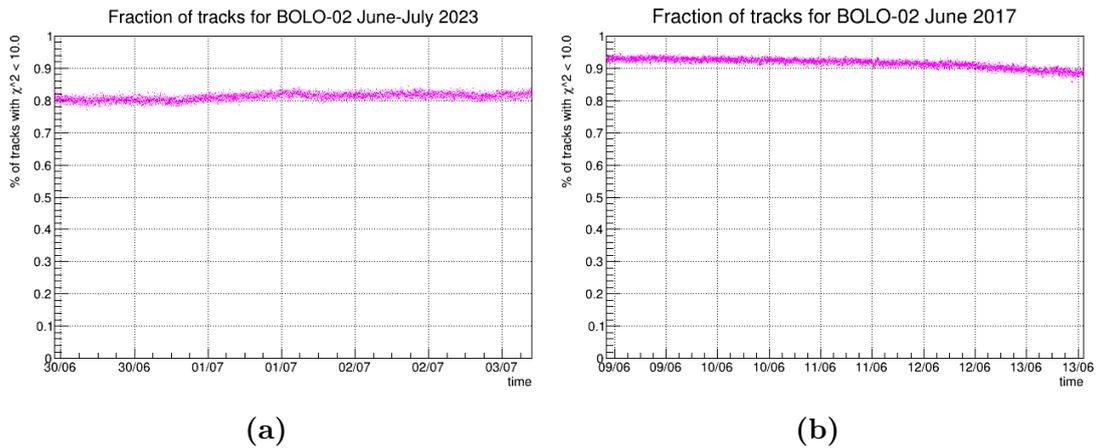
Per il telescopio installato al Liceo Fermi, seppur rientrato da poco nella fase di ripartenza, si sono già potuti confrontare, oltre alle efficienze, gli altri parametri interessanti per valutarne il funzionamento con la nuova miscela. Sono riportati i dati acquisiti a giugno e luglio 2023 in seguito alle operazioni di ripartenza e le misure relative a giugno 2017 così da fare riferimento a dati raccolti nello stesso periodo dell'anno. Nelle annate intermedie il telescopio ha dovuto essere spento o fermato per operazioni di manutenzione nello stesso periodo.

Nella Figure 3.7 si può osservare come entrambe le miscele garantiscano un'acquisizione stabile a rate costante intorno ai 45 Hz. Il rate medio, e in modo maggiore la quantità di tracce ricostruite, sono però leggermente minori con la nuova miscela. Un calo simile

si può osservare anche nella percentuale di eventi ricostruiti con  $\chi^2 < 10$ , mostrata in Figura 3.8, che ammontava a circa il 90% delle tracce con la miscela standard ed è ora invece intorno all'80%.

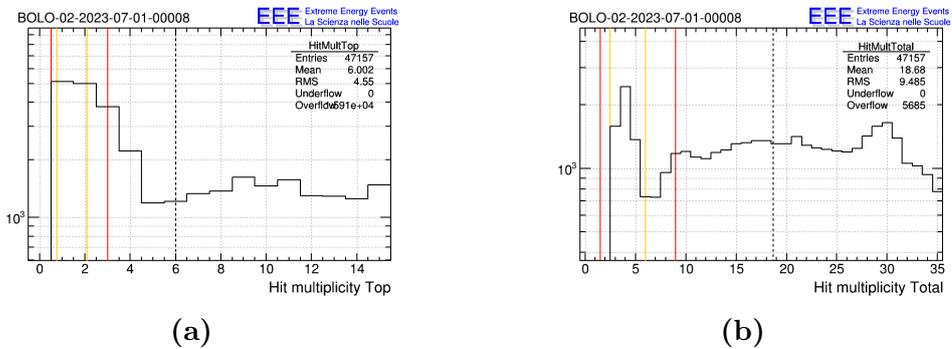


**Figura 3.7:** Evoluzione del rate medio di acquisizione e di tracce ricostruite sul periodo di una settimana a giugno-luglio 2023 con la nuova miscela ecologica (a) e a giugno 2017 con la miscela standard (b).

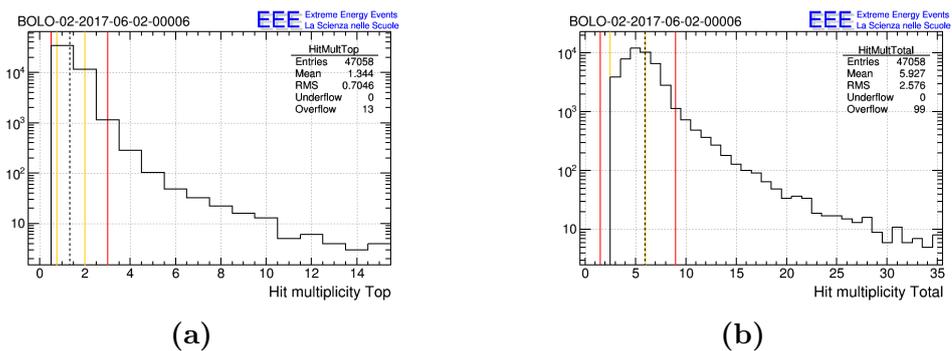


**Figura 3.8:** Percentuale di eventi ricostruiti con  $\chi^2 < 10$  sul periodo di una settimana a giugno-luglio 2023 con la nuova miscela ecologica (a) e a giugno 2017 con la miscela standard (b).

Ciò può essere spiegato, come anticipato nel paragrafo precedente, osservando come è variato il parametro di molteplicità di *hit* delle singole camere e in generale per l'intero telescopio, in seguito all'uso della nuova miscela (Figure 3.9 e 3.10). Poiché i codici di ricostruzione sono ottimizzati per la ricostruzione di eventi a bassa molteplicità (il picco nei grafici relativi al 2017 è molto marcato per una molteplicità di 1 o 2 strip in una singola camera e dunque 5 o 6 nell'intero telescopio), è possibile che la loro efficacia si riduca quando il numero di strip attive si alza, come nel caso delle nuove miscele. I dati che si stanno attualmente acquisendo con i telescopi in ripartenza potranno dunque essere utilizzati per ottimizzare il codice di ricostruzione delle tracce e verificare quindi che le prestazioni dei rivelatori con la nuova miscela siano confrontabili con quelle precedenti.



**Figura 3.9:** Distribuzioni delle molteplicità di *hit* relative alla camera Top (a) e totali (b) per il telescopio BOLO-02 a luglio 2023 in seguito alla ripartenza con la nuova miscela [23].



**Figura 3.10:** Distribuzioni delle molteplicità di *hit* relative alla camera Top (a) e totali (b) per il telescopio BOLO-02 a giugno 2017 quando il telescopio utilizzava la miscela standard [23].

# Conclusioni

Il Progetto Extreme Energy Events si occupa dello studio dei raggi cosmici attraverso la rivelazione della componente muonica a terra e lo fa coinvolgendo numerosi studenti delle scuole superiori in un programma di ricerca scientifica. Il Progetto utilizza telescopi costituiti da Multigap Resistive Plate Chambers di grande area ( $\sim 2 \text{ m}^2$ ), rivelatori a gas basati sulla tecnologia dei rivelatori del sistema di tempo di volo dell'esperimento ALICE al CERN. I rivelatori del Progetto EEE, tipicamente alimentati ad una tensione di  $20 \text{ kV}$  e flussati con un'opportuna miscela di gas, hanno efficienze prossime al 100% e ottime risoluzioni temporali e spaziali. La miscela di gas utilizzata sin dall'inizio del Progetto EEE, ovvero una combinazione al 98% di tetrafluoroetano  $C_2H_2F_4$  (in forma di freon HFC-134a) e al 2% di esafluoruro di zolfo  $SF_6$ , ha tuttavia un alto impatto ambientale e dunque negli ultimi anni la Collaborazione EEE ha deciso di avviare una fase di aggiornamento dei telescopi per trovare una miscela alternativa ecologica. La scelta naturale è stata quella di studiare miscele di tetrafluoropropene  $C_3H_2F_4$  (in forma HFO-1234ze), molecola abbastanza simile al tetrafluoroetano, abbinato a  $He$  o  $CO_2$ ; i risultati dei primi test, avviati già nel 2015, hanno suggerito che i telescopi del Progetto EEE potessero essere operati utilizzando tali miscele, continuando a lavorare con prestazioni comparabili a quelle garantite dalla miscela standard.

In questa tesi sono state studiate in particolare alcune prestazioni di uno dei telescopi della rete EEE situato in una scuola di Bologna, il Liceo Scientifico Statale "Enrico Fermi". Il rivelatore, infatti, dopo un periodo di stop delle attività sia per l'emergenza legata al COVID-19, sia per il passaggio alla nuova miscela, è stato recentemente riavviato. In una prima fase la messa in funzione del telescopio ha comportato una serie di controlli standard sui rivelatori e sulle apparecchiature elettroniche. In particolare, per quanto concerne i rivelatori a gas, uno dei controlli principali è quello della tenuta di gas: Il funzionamento ottimale dei rivelatori infatti è garantito, oltre che dall'utilizzo di una miscela opportuna, anche dall'assenza di perdite che, anche se minime, possono provocare un non perfetto funzionamento dei rivelatori.

Il telescopio in esame, denominato BOLO-02, è stato rimesso in funzione nei primi mesi del 2023 con l'obiettivo di eseguire test utilizzando una miscela ecologica basata su 50% di  $C_3H_2F_4$  e 50% di elio. La prima misura effettuata per controllare la funzionalità dei rivelatori con la nuova miscela è stata la misura della curva di efficienza: al variare della

tensione applicata agli elettrodi di uno dei tre rivelatori si è misurato il numero le particelle rivelate da quest'ultimo sul numero totale di particelle che lo hanno attraversato, ricavato utilizzando le altre due camere del telescopio come camere di riferimento. Si è osservato che operando i rivelatori del telescopio con la nuova miscela si ottengono curve di efficienza che raggiungono un plateau dell'ordine del 95% per una tensione applicata compresa tra i 18 e 20  $kV$  analogamente a quanto si otteneva con la miscela standard. Tali risultati sono in accordo con le misure effettuate su altri telescopi della rete EEE che hanno ripreso le attività utilizzando la stessa miscela.

Sono stati poi presi in esame alcuni parametri di funzionamento del rivelatore per valutarne la stabilità. Ad esempio si sono monitorati il rate medio di segnali acquisiti dal telescopio in funzione del tempo e il rate di tracce ricostruite con  $\chi^2 < 10$  (criterio utilizzato per definire tracce di muoni); il lasso temporale preso in esame è ridotto poiché il telescopio è entrato in fase di acquisizione dati solo a fine giugno dopo il completamento delle misure di efficienza, ma, confrontando i dati acquisiti con quelli relativi alla miscela standard, entrambi i rate si sono rivelati stabili.

Da questi primi dati si osserva tuttavia un lieve peggioramento nella percentuale di tracce ricostruite, scesa dal 90% per i dati acquisiti con la miscela standard all'80% con la nuova miscela. Dall'analisi dei dati a disposizione si osserva anche una maggiore molteplicità di strip con segnale a seguito del passaggio di una particella utilizzando la nuova miscela: mentre con la miscela standard si aveva una molteplicità media di poco superiore ad una strip per una singola camera, con la nuova miscela tale parametro tende a crescere, raggiungendo una media nell'ordine delle 6 strip. Tale grandezza può influenzare le routine di ricostruzione delle tracce che sono ottimizzate per la miscela standard ed in particolare gli algoritmi di clusterizzazione delle strip possono risentire della dimensione media dei cluster stessi.

I dati acquisiti e le misure effettuate per questo lavoro di tesi, oltre ad essere in accordo con misure effettuate su altri telescopi della rete EEE, stanno fornendo quindi indicazioni utili per l'ottimizzazione dei codici di ricostruzione ed analisi dati per i telescopi del Progetto EEE alimentati con le nuove miscele.

# Bibliografia

- [1] Alessandro De Angelis. *L'enigma dei raggi cosmici*. Springer, 2012.
- [2] *Raggi cosmici*. <https://www.lngs.infn.it/it/raggi-cosmici>.
- [3] Thomas K. Gaisser. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 1990.
- [4] D. H. Perkins. *Particle Astrophysics*. Oxford University Press, 2003.
- [5] Alberto Daniel Supanitsky. “Determination of the Cosmic-Ray Chemical Composition: Open Issues and Prospects”. In: *Galaxies* 10(3), 75 (2022).
- [6] Carmelo Evoli. *The Cosmic-Ray Energy Spectrum*. Zenodo, 2020.
- [7] Marco Antani. *Astroparticelle - I raggi cosmici - L'effetto Est-Ovest*. [https://www.astroparticelle.it/public/Effetto-Est-Ovest\\\_pub.pdf](https://www.astroparticelle.it/public/Effetto-Est-Ovest\_pub.pdf).
- [8] M. Abbrescia et al. “Measurement of the cosmic charged particle rate at sea level in the latitude range 35°-82° N with the PolarquEEEst experiment”. In: *The European Physical Journal* 83 (2023).
- [9] Anne Zilles. “Introduction to cosmic rays and extensive air showers.” In: *Emission of Radio Waves in Particle Showers*, Springer, 2017, p. 1.
- [10] Todor Stanev. *High Energy Cosmic Rays*. Springer, 2010.
- [11] J. Abraham et al. “Upper limit on the cosmic-ray photon flux above 10<sup>19</sup> eV using the surface detector of the Pierre Auger Observatory”. In: *Astroparticle Physics* 29(4), 243 (2008).
- [12] M. Bustamante et al. “High-energy cosmic-ray acceleration”. In: *5th CERN - Latin-American School of High-Energy Physics*, CERN (2010), p. 533.
- [13] G. J. Escobar, L. J. Pellizza e G. E. Romero. “Highly collimated microquasar jets as efficient cosmic-ray sources”. In: *Astronomy & Astrophysics* 665.A145 (2022).
- [14] Yutaka Fujita, Kohta Murase e Shigeo S. Kimura. “Sagittarius A\* as an origin of the Galactic PeV cosmic rays?” In: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 04 (2017).

- [15] Daniel Biehl et al. “Gamma-Ray Bursts as Sources of Ultra-High Energy Cosmic Rays across the Ankle”. In: *Proceedings of Science ICRC2019* (2019), p. 196.
- [16] *Progetto Extreme Energy Events (EEE) - La Scienza nelle Scuole*. <https://eee.centrofermi.it/it/>.
- [17] Antonino Zichichi. *Progetto "La Scienza nelle Scuole" EEE-Extreme Energy Events*. SIF, 2017.
- [18] Chiara Pinto. “Outreach and educational activities within the EEE cosmic ray network”. In: *Proceedings of Science ICRC2021* (2021), p. 1366.
- [19] collaborazione EEE. “Come varia il flusso dei raggi cosmici con la quota? Basta chiederlo agli studenti del progetto EEE”. In: *Giornale di Fisica* 3 (2018), pp. 229–249.
- [20] M. Abbrescia et al. “Looking at the sub-TeV sky with cosmic muons detected in the EEE MRPC telescopes”. In: *The European Physical Journal Plus* 130 (2015), p. 187.
- [21] Ivan Gnesi. “Results from the observations of Forbush decreases by the Extreme Energy Events experiment”. In: *Proceedings of Science ICRC2015* (2016), p. 097.
- [22] P. La Rocca et al. “Looking for long-range correlations among the EEE telescopes”. In: *Proceedings of Science ICRC2021* (2022), p. 292.
- [23] *EEE Monitor - DQM*. <https://iatw.cnaf.infn.it/eee/monitor/>.
- [24] M Garbini. “The PolarquEEEst mission: Measuring the cosmic ray flux at the North Pole”. In: *Nuovo Cimento C* 42 (2020), p. 229.
- [25] A.V. Akindinov et al. “Results from a large sample of MRPC-strip prototypes for the ALICE TOF detector”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 532 (2004), p. 611.
- [26] M. Abbrescia et al. “Performance of a six gap MRPC built for large area coverage”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 593 (2008), pp. 263–268.
- [27] M. Abbrescia et al. “The Extreme Energy Events experiment: an overview of the telescopes performance.” In: *Journal of Instrumentation* 13 (2018), P08026.
- [28] M. Abbrescia et al. “Recent results and performance of the multi-gap resistive plate chambers network for the EEE Project”. In: *Journal of Instrumentation* 11 (2016), p. C11005.
- [29] M. Garbini et al. “Outreach activities of the Extreme Energy Events Project”. In: *Proceedings of Science ICHEP2022* (2022), p. 380.
- [30] M.P. Panetta et al. “Strategies to reduce the environmental impact in the MRPC array of the EEE experiment”. In: *Journal of Instrumentation* 15 (2020), p. C11011.

- [31] E. Bossini et al. “Studies on new Eco-gas mixtures for Extreme Energy Events Project”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 1046 (2023), p. 167754.