

FISICA PER TUTTI

Come varia il flusso dei raggi cosmici con la quota? Basta chiederlo agli studenti del progetto EEE

How does cosmic ray flux vary with altitude? Let's ask it to EEE project students

Collaborazione EEE (*)

*Centro Fermi - Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi"
Piazza del Viminale 1, 00184 Roma, Italia*

Riassunto. La misura del flusso dei raggi cosmici al variare dell'altitudine rappresenta uno degli esperimenti che permise di comprendere la natura non terrestre della radiazione cosmica. Ancora oggi tale misura viene ripetuta a scopo didattico, facendo uso di apparati sperimentali più evoluti degli elettroscopi adoperati dai pionieri della fisica dei raggi cosmici. In questo articolo è descritta una misura del flusso dei raggi cosmici effettuata a diverse altitudini, dal livello del mare fino a quota 760 m. La misura è stata realizzata da un numeroso gruppo di studenti e docenti provenienti da 44 scuole italiane, riunitisi presso la Fondazione e Centro di Cultura Scientifica "Ettore Majorana" a Erice in occasione dell'Ottava Conferenza dei Progetti del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi", dedicata al progetto Extreme Energy Events.

Abstract. The measurement of the cosmic ray flux as a function of the altitude is a crucial experiment that played a key role in the comprehension of the nature of cosmic rays at the beginning of the 20th century. Today this measure is still carried out for educational purpose, using experimental set-ups that are, by far, more sophisticated than the electroscopes employed by the pioneers of the cosmic ray physics. In this article we describe a measurement of the cosmic ray flux carried out from the sea level up to an altitude of 760 m. The measurement was performed by a large group of students and teachers belonging to 44 Italian high schools, that met together at the "Ettore Majorana" Foundation and Center for Scientific Culture in Erice to attend the 8th Conference on the Projects of the Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi", devoted to the Extreme Energy Events project.

(*) Lista completa in coda all'articolo.

1. Introduzione

È ormai noto da più di un secolo che la radiazione cosmica primaria ha origine non terrestre, essendo emessa da sorgenti di natura galattica o extra-galattica. Sulla Terra la nostra atmosfera funge da filtro, poiché assorbe gran parte delle particelle secondarie che vengono prodotte, in processi a cascata, a seguito dell'interazione dei cosmici primari con gli atomi e le molecole presenti negli strati più esterni dell'atmosfera. Solo le particelle più penetranti, come i muoni, riescono a raggiungere la superficie terrestre. Non a caso queste particelle costituiscono, insieme ai pioni, la cosiddetta componente dura della radiazione cosmica secondaria, che si distingue dalla componente molle costituita principalmente da gamma, positroni ed elettroni, particelle che vengono facilmente assorbite dall'atmosfera terrestre.

Effettuando una misura del flusso dei raggi cosmici secondari all'aumentare dell'altitudine si osserva infatti, dopo una leggera decrescita dovuta al venir meno del contributo di radioattività naturale proveniente dalla crosta terrestre, un evidente aumento del flusso di particelle rivelate.

L'origine non terrestre della radiazione cosmica rappresenta indubbiamente una delle scoperte più affascinanti della fisica del XX secolo, sia per la semplicità degli apparati di rivelazione adoperati, sia per le modalità con cui venne effettuata tale scoperta.

Ancora oggi lo studio della variazione del flusso dei raggi cosmici in funzione dell'altitudine rappresenta, da un punto di vista didattico, una misura di particolare rilevanza, in quanto permette di dimostrare in modo semplice e diretto l'origine non terrestre della radiazione cosmica.

In questo articolo, dopo una breve introduzione storica sulle misure condotte ad alta quota all'inizio del XX secolo (sez. 2), presenteremo una misura del flusso dei raggi cosmici realizzata a diverse altitudini da un gruppo di circa 90 studenti e 45 insegnanti aderenti al progetto Extreme Energy Events (EEE) coordinato dal Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi". Nella sez. 3 è quindi presentato il progetto EEE e le sue iniziative; nella sez. 4 è descritto l'apparato sperimentale adoperato e i dettagli della misura, mentre nella sez. 5 sono riportati i dati sperimentali e la procedura di analisi. Infine l'articolo si conclude nella sez. 6 con una discussione critica dei risultati ottenuti.

2. Studio dei raggi cosmici in funzione dell'altitudine: misure storiche e moderne

Le prime evidenze dell'esistenza di una radiazione ionizzante naturale nell'atmosfera si ebbero già nei primi anni del 1900, quando furono osservati e studiati fenomeni di ionizzazione dell'aria mediante l'uso di elettroscopi sigillati: anche in assenza di sorgenti radioattive nelle immediate vicinanze, i tempi di scarica di questi elettroscopi indicavano la presenza di una radiazione naturale che ionizzava l'aria circostante. Diverse misure furono realizzate per comprendere l'origine e la natura della misteriosa radiazione ionizzante responsabile della scarica degli elettroscopi. Nel 1909 il monaco

gesuita Theodor Wulf, utilizzando un elettroscopio di propria costruzione, effettuò una campagna sistematica di misure della radiazione naturale in diversi luoghi, notando un'anti-correlazione dell'intensità di tale radiazione con la pressione atmosferica [1]. Alla luce di tali osservazioni, Wulf suppose che l'origine della radiazione fosse dovuta alla presenza di sostanze radioattive nel suolo terrestre e che l'aumento della pressione atmosferica provocasse unicamente un effetto di assorbimento. Per provare tale teoria furono eseguite delle misure sulla torre Eiffel a una quota di 300 m [2]. L'esito di tali misure non fu conclusivo, dal momento che l'intensità della radiazione in cima alla torre era ridotta di solo qualche per cento rispetto al suolo, e dunque era ancora troppo elevata per poter confermare un'origine puramente terrestre.

Nel 1910 il fisico italiano Domenico Pacini realizzò delle misure dell'intensità della radiazione naturale sulla superficie del mare, nel golfo di Genova, a una distanza dalla costa tale da poter ritenere trascurabile il contributo di radioattività proveniente dalla superficie terrestre [3, 4]. L'esito delle misure spinse Pacini a concludere che una significativa frazione della radiazione pervasiva trovata nell'aria avesse un'origine indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive presenti negli strati superficiali della Terra. Tale conclusione fu confermata da ulteriori misure che Pacini condusse lontano dalla costa posizionando gli elettroscopi al di sotto del livello del mare, a circa 3 metri di profondità, ma pur sempre a una distanza dal fondale marino tale da poter trascurare un eventuale contributo di origine terrestre [5].

Tra il 1911 e il 1913 Victor Hess realizzò delle misure a bordo di palloni aerostatici, spingendosi fino a una quota di circa 5000 m. Durante i voli egli effettuò delle misure con diversi elettroscopi, opportunamente modificati per non risentire delle variazioni di temperatura e pressione ad alta quota [6, 7]. Egli osservò un'iniziale diminuzione fino a una quota compresa tra i 500 e i 1000 m, a seconda dell'elettroscopio adoperato; al di sopra di tale quota egli misurò un netto aumento dell'intensità della radiazione in funzione dell'altitudine, dimostrando definitivamente che l'origine di tale radiazione fosse in realtà di natura non terrestre. Misure più precise realizzate da Kohlorster nel 1913 permisero di stabilire con maggiore precisione la quota a cui si osservava il minimo di intensità, pari a circa 1000 m.

Il contributo di Hess alla fisica dei raggi cosmici fu subito ritenuto di elevata importanza com'è dimostrato dall'uso dei termini "Höhenstrahlung" (radiazione di elevata altitudine) o "Hesssche Strahlung" (raggi di Hess) utilizzati all'interno della comunità scientifica per far riferimento alla radiazione cosmica. Per la sua scoperta Hess ricevette il premio Nobel nel 1936.

L'introduzione di nuove tecniche di rivelazione permise nel corso del XX secolo studi più approfonditi delle proprietà della radiazione cosmica. Una volta che i fisici furono in grado di discriminare il contributo dovuto alla radioattività terrestre da quello di origine cosmica, molte misure furono condotte presso laboratori in alta montagna, luoghi ideali per questo tipo di ricerca a causa del ridotto strato di atmosfera [8]. Oggi si dispone di misure accurate delle diverse componenti della radiazione cosmica secondaria, realizzate in funzione dell'altitudine a bordo di aerei, palloni, in alta montagna o nello spazio [9–14].

Grazie all'esistenza in commercio di rivelatori di particelle relativamente semplici,

portatili e a basso costo, la misura della dipendenza del flusso dei raggi cosmici al variare dell'altitudine rappresenta un esperimento di facile realizzazione da parte di studenti della scuola superiore, come si evince dai numerosi risultati pubblicati sul web (si vedano ad esempio i riferimenti [15–26]).

Spesso la realizzazione di una misura sui raggi cosmici rappresenta uno strumento utile per introdurre gli studenti a tematiche di più ampio respiro riguardanti la fisica moderna, la fisica delle particelle e le tecniche di rivelazione. Esistono diversi progetti nel mondo, ideati da università ed enti di ricerca, che mirano a coinvolgere studenti delle scuole in attività sperimentali di fisica dei raggi cosmici. In quest'ottica il progetto EEE ha un ruolo speciale perché ha coinvolto nel corso degli ultimi 10 anni diverse migliaia di studenti, realizzando una rete di rivelatori per raggi cosmici installati presso una cinquantina di scuole italiane. Tra le diverse attività organizzate nell'ambito del progetto EEE, gli studenti hanno anche condotto recentemente, in occasione di un *meeting* svoltosi a Erice, una misura del flusso dei raggi cosmici secondari a diverse quote, adoperando dei rivelatori portatili basati sull'utilizzo di scintillatori in coincidenza.

3. Il progetto EEE: descrizione e iniziative

Il progetto EEE [27], realizzato dal Centro Fermi [28], in collaborazione con altri enti di ricerca, tra cui il CERN [29] e l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare [30], consiste in una rete di rivelatori per raggi cosmici. Tali rivelatori sono dislocati su tutto il territorio nazionale e installati, per la quasi totalità, in scuole superiori, ove sono tenuti in funzione da studenti e professori: ogni scuola ha quindi il suo “telescopio” per raggi cosmici. Dopo una prima fase avviata nel 2004, durante la quale sono state incluse alcune scuole pilota, il progetto ha completato nel 2016 una seconda fase, disponendo oggi di una rete di rivelatori che coinvolge circa 50 scuole in tutta Italia. Più di 50 altri istituti scolastici, pur non avendo un telescopio, collaborano al progetto nell'ambito dell'analisi dei dati e delle svariate attività organizzate dalla collaborazione EEE. Una mappa dei siti in cui sono installati i telescopi è mostrata in fig. 1. Si osserva che in molti casi la stessa città ospita un gruppo di più telescopi, detto “*cluster*”, posizionati a distanze relative dell'ordine o inferiore al chilometro.

I telescopi sono costituiti da tre rivelatori a gas, del tipo *Multigap Resistive Plate Chambers* (MRPC), grazie ai quali è possibile ricostruire la direzione di arrivo delle particelle rivelate. La risoluzione temporale intrinseca delle camere è di circa 240 ps. Trattandosi di rivelatori di particelle ionizzanti, essi sono sensibili principalmente a muoni ed elettroni degli sciami secondari. I dati acquisiti dai singoli telescopi permettono di studiare le principali caratteristiche del flusso locale dei raggi cosmici secondari, quali per esempio le variazioni di temperatura o di pressione atmosferiche, le variazioni dovute a eventi solari, eventuali effetti di assorbimento dovuti a ostacoli circostanti, asimmetrie est-ovest, anomalie nei tempi di arrivo dei raggi cosmici e molti altri fenomeni, tutt'oggi oggetto di ricerca nel campo della fisica dei raggi cosmici [31–33]. La selezione di eventi rivelati in coincidenza da due o più telescopi

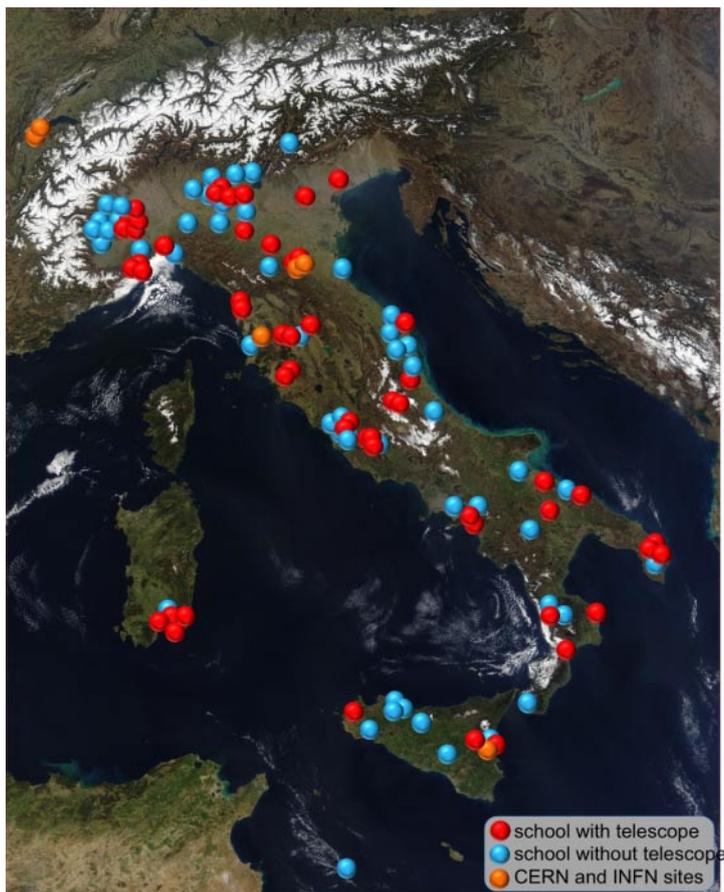


Fig. 1. – Mappa dei 113 tra istituti e laboratori del progetto EEE: sono mostrate le scuole partecipanti al progetto, di cui 50 con telescopio (in rosso) e 55 senza (in blu); inoltre sono anche indicate le 8 stazioni installate presso Dipartimenti di Fisica o Sezioni INFN o il CERN (in arancione).

posizionati all'interno della stessa città, a distanze inferiori al chilometro, permette invece di rivelare sciami atmosferici estesi [34, 35] e di fornire un *trigger* selettivo per altre tipologie di analisi, in cui è indispensabile ridurre al minimo il contributo di eventi spuri. Per esempio, la rete di telescopi EEE ha tutte le caratteristiche necessarie per poter ricercare la possibile esistenza di sciami atmosferici estesi in coincidenza a grande distanza [36]: tale misura si basa sulla selezione di clusters di telescopi per individuare sciami atmosferici estesi e, trattandosi di eventi estremamente rari, richiede un livello di coincidenze accidentali estremamente basso. Maggiori dettagli sul rivelatore e sui risultati conseguiti sono descritti in recenti pubblicazioni [37, 38].

Nonostante la rete abbia già raggiunto un considerevole numero di telescopi (in totale 58 tra le scuole e i laboratori di ricerca), è attualmente in corso la costruzione e l'installazione di nuovi telescopi. Ulteriori occasioni di crescita sono inoltre previste a seguito di contatti già avviati con università straniere e altre collaborazioni estere,

riunite nell'*International Particle Physics Outreach Group (IPPOG)*, che coordina i progetti di studio di raggi cosmici nelle scuole a livello internazionale [39].

La principale caratteristica del progetto EEE è il coinvolgimento delle scuole nell'aspetto scientifico dell'esperimento. Gli studenti partecipano a tutte le fasi, dalla costruzione dei rivelatori, all'installazione, monitoraggio dei telescopi e presa dati. A tale scopo sono stati sviluppati degli strumenti informatici che agevolano gli studenti nelle varie operazioni: una pagina web dedicata al controllo della qualità dei dati [40] fornisce in tempo reale parametri numerici e grafici di controllo che permettono agli studenti e ai ricercatori di verificare giornalmente il corretto funzionamento dei telescopi, senza richiedere necessariamente la presenza fisica in laboratorio. Agli studenti è inoltre richiesta la compilazione giornaliera di un *logbook* elettronico in cui riportare i principali parametri di acquisizione del proprio telescopio [41]. Questi strumenti informatici, uniti a una piattaforma Open Data (ODP) in via di realizzazione, permettono ai ricercatori e agli studenti un più semplice accesso ai telescopi e ai dati acquisiti, agevolando la partecipazione di scuole non dotate di un proprio telescopio.

In analogia a quanto avviene nelle comunità scientifiche, le attività svolte nei vari istituti scolastici vengono presentate durante delle videoconferenze organizzate mensilmente dai ricercatori aderenti al progetto. Oltre a queste occasioni di incontro, il Centro Fermi organizza periodicamente dei simposi nazionali a cui partecipano fisicamente un numero selezionato di studenti e docenti delle scuole EEE. Nel corso del 2017 sono state organizzate due conferenze, la prima a maggio e la seconda a dicembre, presso la Fondazione e Centro di Cultura Scientifica "Ettore Majorana" a Erice (TP). A ciascuna conferenza hanno partecipato circa 45 scuole, per un totale di oltre 150 partecipanti per singolo evento. Il programma delle conferenze, della durata di due giorni, prevedeva dei momenti dedicati alle scuole, durante i quali gli studenti avevano la possibilità di presentare le attività svolte nell'ambito del progetto EEE presso il loro istituto. Il resto del programma includeva lo svolgimento di attività culturali scientifiche, lezioni e *masterclasses* [42] durante ciascuna delle quali i ricercatori EEE hanno illustrato una tematica di analisi seguita da una esercitazione pratica. Durante ciascuna conferenza è stata inoltre organizzata una misura eseguita dagli studenti: a maggio gli studenti hanno effettuato una misura del raggio terrestre mediante il metodo di Eratostene, mentre a dicembre è stato effettuato uno studio della dipendenza del flusso dei raggi cosmici dall'altitudine mediante l'uso di *Cosmic Boxes*, rivelatori costruiti con scintillatori. I risultati di quest'ultima misura sono descritti nel presente articolo.

4. Apparato sperimentale: le Cosmic Boxes

Le *Cosmic Boxes* sono rivelatori di particelle portatili, capaci di segnalare in tempo reale il passaggio dei raggi cosmici. Questa tipologia di rivelatore è stata introdotta durante le prime fasi del progetto EEE per due scopi principali: misurare l'efficienza delle MRPCs e rendere possibili anche una serie di misure didattiche complementari sui raggi cosmici.

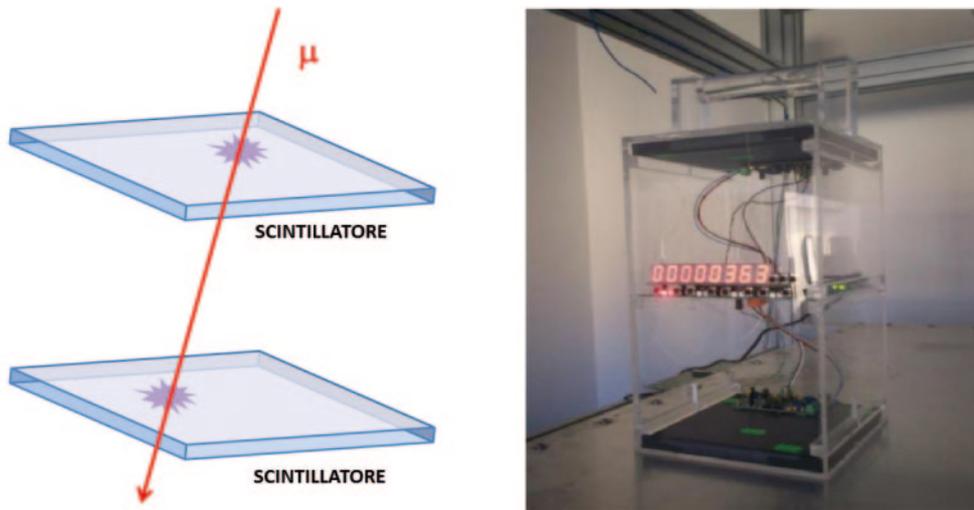


Fig. 2. – Schema di una *Cosmic Box* (a sinistra) e foto di un prototipo (a destra).

4.1. Caratteristiche tecniche delle *Cosmic Boxes*

Una *Cosmic Box* è costituita da due lastre parallele di materiale scintillatore (di dimensioni $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 1\text{ cm}$) poste ad una distanza di circa 30 cm, come mostrato in fig. 2.

Le particelle cariche che attraversano la *Cosmic Box* depositano parte della loro energia all'interno degli scintillatori, producendo in ciascuno di essi un segnale luminoso.

La luce prodotta nello scintillatore dalla particella carica che vi ha depositato energia deve essere opportunamente raccolta e convertita in un segnale elettrico mediante un fotosensore.

Per la realizzazione delle *Cosmic Boxes* sono stati scelti degli scintillatori plastici EJ-200, prodotti dalla Eljen Technology, caratterizzati da una lunghezza di assorbimento di 380 cm e da un'ottima risoluzione temporale, con tempi di salita degli impulsi luminosi inferiori a 1 ns e durata pari a 2.5 ns [43]. La resa in luce è tale che il passaggio di elettroni e muoni cosmici produce un segnale luminoso sufficientemente intenso da poter essere rivelato dal fotosensore con un'efficienza molto elevata.

Il fotosensore scelto per le *Cosmic Boxes* è un *Silicon PhotoMultiplier* (SiPM), cioè una matrice di fotodiodi a valanga, detti *pixel*, operanti in modalità Geiger e collegati in parallelo: la carica complessiva in uscita dal SiPM è proporzionale al numero di *pixel* della matrice attivati dai fotoni incidenti.

Il modello di SiPM adoperato nelle *Cosmic Boxes* di EEE è il NUV3S-P, prodotto dalla ADVANSID, di dimensioni $3 \times 3\text{ mm}^2$ con *pixel* da $40\text{ }\mu\text{m}$ di lato [44].

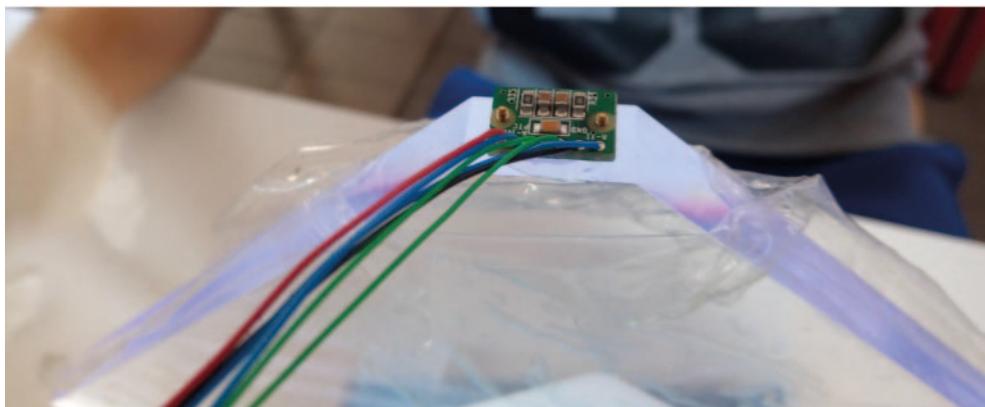


Fig. 3. – Accoppiamento tra il fotosensore e lo scintillatore.

Lo spettro della luce emessa dal tipo di scintillatore scelto presenta un massimo attorno a 425 nm, cioè nella stessa regione di lunghezza d'onda in corrispondenza della quale il fotosensore adoperato è maggiormente efficiente.

Dal momento che i fotoni di scintillazione vengono emessi con la stessa probabilità in tutte le direzioni dello spazio, è necessario convogliarli verso quella piccola porzione di superficie dello scintillatore che è accoppiata con il fotosensore. A seguito di studi e simulazioni del trasporto dei fotoni all'interno dello scintillatore, si è deciso di accoppiare il fotosensore in corrispondenza di uno spigolo dello scintillatore, interponendo del grasso ottico, come illustrato in fig. 3.

Per meglio convogliare la luce sul fotosensore, le lastre sono state interamente rivestite con un materiale riflettente e successivamente avvolte con del nastro adesivo nero, per schermare la luce ambientale. Solo la regione di accoppiamento fra lo scintillatore e il fotosensore non è stata rivestita.

La *Cosmic Box* è dotata a bordo di un'apposita elettronica, che permette di selezionare quali eventi rivelare: è possibile scegliere se acquisire gli eventi relativi a un segnale prodotto nello scintillatore in alto, quelli relativi a un segnale prodotto nello scintillatore in basso o quelli prodotti da un segnale simultaneo in entrambi gli scintillatori. Il numero di eventi acquisiti viene mostrato in tempo reale su un *display*.

Bisogna però considerare che i fotomoltiplicatori al silicio sono sensibili anche a stimoli luminosi molto deboli, e quindi sono dispositivi che generano un alto numero di segnali di fondo. Per ridurre la probabilità di avere segnali spuri, si è deciso di associare a ciascuno scintillatore una coppia di SiPM da adoperare in coincidenza.

In ciascuno scintillatore i segnali dei due SiPM vengono amplificati e paragonati con una soglia di riferimento, per poi essere inviati a un circuito AND in modo da selezionare solo gli eventi in coincidenza.

Come detto, un ulteriore circuito di coincidenza è infine adoperato per selezionare gli eventi in cui si è verificato simultaneamente un segnale in entrambi gli scintilla-

tori, selezionando quindi soltanto quelle particelle che giungono entro l'angolo solido stabilito dalle caratteristiche geometriche del rivelatore. Tanto maggiore è la distanza fra i due scintillatori, tanto meglio sarà definita la direzione delle particelle rivelate, perché l'angolo solido sotteso dai due scintillatori è corrispondentemente più piccolo.

L'intera *Cosmic Box* viene alimentata con un'unica tensione di 5 V, che può essere fornita attraverso un connettore *jack* oppure mediante un connettore USB. Questa seconda soluzione ha permesso di utilizzare le *Cosmic Boxes* in ambienti aperti, alimentandole con delle *power banks* commerciali.

Le *Cosmic Boxes* adoperate durante la misura descritta in questo articolo sono state assemblate dagli studenti dell'Istituto Tecnico Industriale Statale "Amedeo Avogadro" di Torino sotto la supervisione di alcuni ricercatori *EEE*.

Dopo la fase di costruzione, ogni scintillatore è stato calibrato impostando un valore di soglia nei comparatori equivalente a circa 1 MeV di energia depositata in ciascuno scintillatore. In tali condizioni, il numero di conteggi al secondo misurato da ciascuno scintillatore era di circa 10 Hz, confrontabile cioè con quanto atteso dal flusso dei raggi cosmici su una superficie di $15 \times 15 \text{ cm}^2$.

È importante sottolineare che la soglia impostata permette di non rivelare una buona percentuale dei γ ambientali provenienti dal suolo, i quali presentano tipicamente energie al di sotto dei 2 MeV. Tramite simulazioni GEANT3 [45] è stato possibile valutare la probabilità di rivelazione di raggi γ ambientali incidenti su uno scintillatore plastico con caratteristiche geometriche simili a quelle dei rivelatori adoperati nelle *Cosmic Boxes*: la probabilità che un γ interagisca con uno scintillatore e vi depositi almeno 1 MeV di energia risulta essere dell'ordine di 0.2%, pressoché trascurabile rispetto alla probabilità di rivelare muoni cosmici, prossima invece al 100%. Il risultato delle simulazioni è stato confermato sperimentalmente: effettuando delle misure a diretto contatto col terreno o posizionando la *Cosmic Box* al di sopra di uno schermo metallico (1 cm di ferro) disposto ad alcuni metri da terra, non sono state evidenziate differenze significative nel numero di conteggi al secondo fornito da ciascun scintillatore. Tuttavia, poiché tale risultato può dipendere dallo specifico luogo in cui si svolge la misura, adoperando dati presenti in letteratura riteniamo ragionevole concludere che le particelle rivelate dai singoli scintillatori siano costituite per la maggior parte (circa il 90%) dai muoni e dagli elettroni più energetici della radiazione cosmica secondaria, mentre il contributo dovuto ai γ sia comunque inferiore al 10%.

Infine, richiedendo la coincidenza tra i due scintillatori, la probabilità di rivelare raggi γ diventa nulla, come confermato dalle simulazioni GEANT3 e da diverse misure condotte in laboratorio esponendo le *Cosmic Boxes* a sorgenti radioattive γ : infatti, affinché una *Cosmic Box* riveli un γ , è necessario che questo interagisca con uno dei due scintillatori e che una delle particelle prodotte a seguito di questa interazione (γ o elettroni) interagisca a sua volta con l'altro scintillatore, dovendo inoltre rilasciare in entrambi gli scintillatori un'energia superiore alla soglia impostata.

Dette ν_1 e ν_2 le frequenze di conteggio in ognuno dei due scintillatori, è possibile

valutare il numero di coincidenze accidentali per secondo attraverso la formula

$$(1) \quad \nu = 2\nu_1\nu_2\Delta T \approx 2(10 \text{ Hz})^2 \cdot 10^{-7} \text{ s} \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ Hz},$$

dove ΔT (100 ns) è la finestra temporale entro cui i segnali dei due scintillatori si considerano in coincidenza.

Il numero medio di conteggi al secondo che si può ottenere con una *Cosmic Box* dipende dall'accettanza del rivelatore, che a sua volta è funzione della distanza tra i due scintillatori. Nella configurazione scelta, in cui i due scintillatori sono posti alla distanza di 30 cm, il numero atteso di conteggi al secondo è di circa 0.5 Hz.

4.2. Metodologia di misura

I partecipanti alla Conferenza che si è tenuta a Erice a dicembre 2017 sono stati suddivisi in 15 gruppi di lavoro, ciascuno dei quali costituito in media da 6 studenti e 3 docenti, provenienti da 3 scuole differenti.

Ciascun gruppo, dotato di una *Cosmic Box*, ha effettuato delle campagne di misura in tre luoghi a differente altitudine: Erice (760 m s.l.m.), Segesta (270 m s.l.m.) e Castellammare del Golfo (20 m s.l.m.). La latitudine dei tre luoghi di misura differisce di poco e si aggira intorno a 38°N.

Dal momento che la frequenza di conteggio con cui ciascuna *Cosmic Box* rivelava raggi cosmici era dell'ordine di 0.5 Hz, si è stimato che ciascun gruppo dovesse acquisire dati, a ogni altitudine, per un tempo di circa 30 minuti. Nel tempo di acquisizione scelto ci aspettiamo un numero di conteggi N_s pari all'incirca a

$$(2) \quad N_s = 30 \times 60 \text{ s} \times 0.5 \text{ Hz} = 900.$$

Utilizzando 15 *Cosmic Boxes* e sommando i conteggi, ci aspettiamo complessivamente un numero N_{tot} di conteggi dell'ordine di

$$(3) \quad N_{\text{tot}} = 900 \times 15 = 13500.$$

Considerando l'errore statistico dato dalla distribuzione di Poisson (\sqrt{N}) e l'errore relativo \sqrt{N}/N , ci aspettiamo una situazione come quella descritta in tabella I.

Pertanto, con 15 *Cosmic Boxes* in misura simultanea, ci aspettiamo di poter apprezzare variazioni del flusso pari a qualche percento.

TABELLA I. – Incertezza assoluta e relativa attese per misure effettuate con una singola *Cosmic Box* e con l'uso simultaneo di 15 *Cosmic Boxes*.

	\sqrt{N}	\sqrt{N}/N
Singola <i>Cosmic box</i> ($N_s = 900$)	30	3.3%
15 <i>Cosmic Boxes</i> ($N_{\text{tot}} = 13500$)	116	0.9%



Fig. 4. – Foto degli studenti impegnati a effettuare le misure durante la *masterclass* (sinistra), a Erice (centro) e a Castellammare del Golfo (destra).

Tutte le acquisizioni sono state effettuate cercando, per quanto possibile, di collocare le *Cosmic Boxes* su di una superficie piana, in un luogo dove il rivelatore non fosse oscurato da un muro o da un palazzo, e coprendo la *Cosmic Box* con un apposito telo protettivo in alluminio riflettente per oscurare la luce solare e proteggere le *Cosmic Boxes* da eventuali perturbazioni di tipo elettromagnetico.

In corrispondenza di ogni misura gli studenti hanno annotato il numero di conteggi ottenuti e i valori di pressione, temperatura e altitudine misurati con i propri *smartphones*.

In fig. 4 sono mostrate alcune foto degli studenti durante la realizzazione delle misure nei diversi siti.

Le campagne di misura, effettuate nell'arco di un'escursione di circa 6 ore, sono state precedute da una *masterclass* svolta in aula durante la quale i ricercatori *EEE* hanno introdotto delle nozioni base di statistica, che i ragazzi hanno potuto immediatamente applicare durante un'esercitazione realizzata in aula utilizzando le stesse *Cosmic Boxes*.

I risultati che verranno descritti in questo articolo sono stati presentati agli studenti durante una delle lezioni conclusive della Conferenza, mostrando loro la procedura di analisi e discutendo criticamente quanto ottenuto.

5. Risultati sperimentali

In fig. 5 sono riportate le distribuzioni del numero di conteggi al secondo misurate dalle 15 *Cosmic Boxes* alle quote di 20, 274 e 760 m s.l.m., rispettivamente. Si nota subito come all'aumentare della quota il valor medio delle distribuzioni si sposti verso un valore più elevato.

Nel caso della quota più elevata la distribuzione mostrata è il risultato della somma di due acquisizioni, una prima misura della durata di 30 minuti (identica alle misure effettuate alle altre due quote) realizzata di mattina, e una seconda misura della durata di circa due ore, realizzata di sera. Laddove entrambe le misure hanno fornito

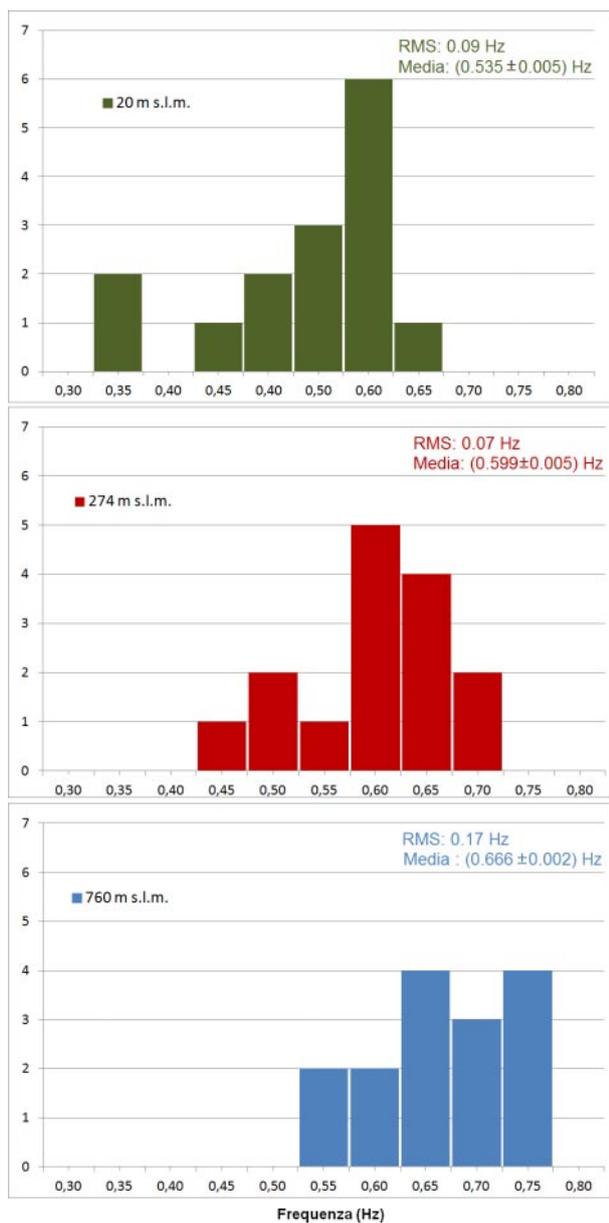


Fig. 5. – Distribuzione delle frequenze di conteggio delle 15 *Cosmic Boxes* alle diverse altitudini. Per ciascuna distribuzione è indicato il valore della deviazione standard e della media pesata.

dei risultati accettabili, la frequenza di conteggio è stata calcolata sulla somma dei conteggi ottenuti divisi per il tempo totale di acquisizione (2 ore e mezza circa). Soltanto in tre casi abbiamo utilizzato i dati di una sola misura effettuata a 760 m, perché la misura supplementare non era stata condotta (*Cosmic Box* n. 5) o non

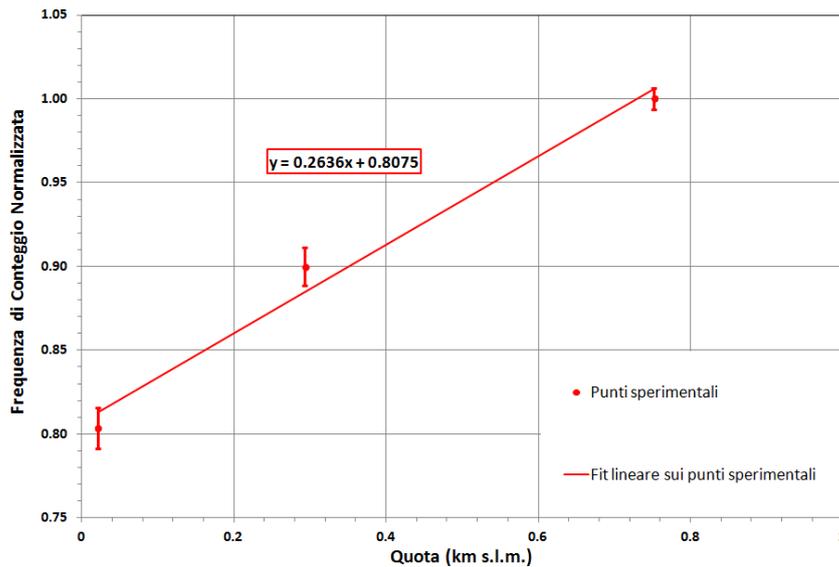


Fig. 6. – Frequenza di conteggio misurata sommando i dati delle 15 *Cosmic Boxes*, al variare dell'altitudine. I dati sono stati normalizzati alla quota di 760 m s.l.m. Per una più chiara leggibilità del grafico la scala verticale non presenta lo zero come valore minimo. Nel riquadro rosso il risultato del fit ottenuto come spiegato nel testo.

aveva fornito risultati accettabili a causa di palesi malfunzionamenti (*Cosmic Boxes* n. 9 e 13).

La frequenza di conteggio misurata alle tre quote è mostrata in fig. 6. I dati sono stati normalizzati alla quota di 760 m s.l.m., per renderli indipendenti dall'efficienza della singola *Cosmic Box*. Si è scelto di normalizzare i dati alla quota di 760 m perché è quella in corrispondenza della quale abbiamo la maggiore statistica, per quanto descritto precedentemente.

Supponendo in prima approssimazione una relazione lineare della frequenza di conteggio normalizzata (y) in funzione della quota (x), è stato realizzato un *fit* sui punti sperimentali mostrati in fig. 6 e dalla pendenza della retta è stata estratta una variazione percentuale del flusso pari a $(26 \pm 1)\%/km$. In alternativa, una stima più conservativa dell'incertezza si può ottenere considerando le rette di massima e minima pendenza, cioè le due rette estreme che passano attraverso le barre di errore dei punti sperimentali. Seguendo questa procedura si ottiene una variazione percentuale del flusso pari a $(26 \pm 2)\%/km$, risultato che confronteremo nella sez. 6 con quanto ottenuto da altri esperimenti o previsto dalle simulazioni.

6. Discussione dei risultati

Risultato della misura è un valore di variazione percentuale del flusso dei raggi cosmici al variare dell'altitudine. È possibile quindi confrontare quanto ottenuto con

altri risultati sperimentali presenti in letteratura, tenendo però presente che eventuali discrepanze possono essere dovute a svariati fattori non sempre quantificabili. Tra questi bisogna considerare eventuali effetti geomagnetici, caratteristici del luogo in cui viene effettuata la misura; oppure effetti dovuti alla modulazione del Sole, la cui intensità varia nel tempo causando piccole alterazioni del risultato ottenuto. Una particolare attenzione deve essere prestata inoltre alle specifiche dell'apparato sperimentale adoperato. Queste ad esempio stabiliscono l'angolo solido entro cui vengono rivelate le tracce rispetto alla verticale: gli apparati in configurazione telescopica, come quello descritto in questo articolo, misurano tipicamente l'intensità direzionale integrata in un angolo solido non grande attorno alla verticale, e possono fornire risultati leggermente diversi se confrontati con rivelatori che integrano su tutto l'angolo solido. Inoltre la tipologia di rivelatore e l'utilizzo di schermi stabiliscono a quali componenti della radiazione cosmica o della radioattività ambientale si è maggiormente sensibili. Ad esempio nel nostro caso è stato verificato che le *Cosmic Boxes* risultano essere principalmente sensibili ai muoni e agli elettroni più energetici della radiazione cosmica, per cui il confronto con altre misure sperimentali deve essere effettuato tenendo conto di questo aspetto. Infine, nell'estrarre dalle diverse fonti bibliografiche un dato numerico da confrontare con il nostro risultato, non sempre è stato possibile stimare l'incertezza del dato estratto, in quanto spesso si è proceduto attraverso un'interpolazione dei punti sperimentali riportati sui grafici per estrarre un valore di variazione percentuale del flusso in corrispondenza della regione di interesse della nostra misura (0–760 m). Per le ragioni elencate è ragionevole attendersi un accordo non più che qualitativo con misure analoghe riportate in letteratura.

Un primo importante confronto è stato effettuato facendo riferimento alle misure del flusso verticale dei raggi cosmici, realizzate da Rossi, Hilberry e Hoag nel 1940, per mezzo di un telescopio di tubi Geiger [46, 47]. Le misure furono realizzate in luoghi a una latitudine compresa tra 49° e 53° , dal livello del mare fino a quota 4300 m. Interponendo tra i contatori Geiger degli opportuni strati di piombo, i tre fisici selezionarono la componente dura (quindi muoni) della radiazione cosmica, ottenendo nella regione di nostro interesse (0–760 m s.l.m.) una variazione percentuale del flusso pari a circa 17%/km, valore inferiore rispetto a quanto ottenuto dalla nostra misura. Nel confrontarci con questo risultato bisogna ricordare le differenze nelle tecniche di rivelazione adoperate e la differente latitudine del luogo di misura: in particolare le nostre *Cosmic Boxes* rivelano, oltre che muoni, anche gli elettroni cosmici più energetici e ciò contribuisce ad aumentare il valore sperimentale misurato rispetto a quanto atteso per la pura componente dura.

Altri confronti possono essere svolti consultando i molteplici risultati disponibili in rete e prodotti durante attività sperimentali simili alla nostra, svolte da studenti in svariate parti del mondo. A titolo di esempio abbiamo confrontato il nostro risultato con quello ottenuto nel 2009 da un gruppo di studenti liceali di una scuola di Catania, che ha misurato il flusso dei raggi cosmici utilizzando dei contatori Geiger, durante un'escursione scientifica sul monte Etna, partendo da una quota di 200 m e arrivando fino a 3000 m s.l.m. [16]. Gli studenti avevano schermato in quell'occasione

i contatori Geiger con delle lastre di metallo, per ridurre la contaminazione dovuta alla radioattività del suolo, particolarmente rilevante nel caso di contatori Geiger in prossimità di roccia vulcanica. La latitudine del luogo in cui è stata svolta la misura è abbastanza simile a quella dei luoghi in cui gli studenti EEE hanno adoperato le *Cosmic Boxes*. Il risultato ottenuto da questi studenti è pari a circa 18%/km, anch'esso inferiore al valore estratto dai nostri dati sperimentali. L'utilizzo di apparati sperimentali differenti può certamente spiegare questa discrepanza, essendo i contatori Geiger potenzialmente più sensibili alla contaminazione da parte di elettroni cosmici e radioattività ambientale.

Nell'ambito del progetto *Cosmos à l'École*, finanziato dal Ministero dell'Istruzione Francese, sono state messe a confronto misure del flusso dei raggi cosmici effettuate in sei diverse scuole, con altitudini da 60 m fino a 460 m s.l.m. [22]. Le scuole erano localizzate tra Tolosa e Strasburgo, quindi con latitudini comprese tra 43° e 48°. Gli studenti hanno adoperato dei telescopi costituiti da tre scintillatori posti in coincidenza. Con questa configurazione è stata misurata una variazione percentuale del flusso pari a circa a 37%/km, significativamente diversa quindi dai risultati finora analizzati.

Sempre in Francia, alcuni ricercatori del *Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux - Gradignan* hanno realizzato un rivelatore portatile, denominato COSMIX, costituito da due barre di scintillatore (ioduro di cesio drogato al tallio) [22]. Una misura effettuata durante un volo privato fino a una quota massima di 1800 m ha fornito un risultato di circa 25%/km, valore in buon accordo con quanto misurato dalle nostre *Cosmic Boxes*.

Alcuni ricercatori del Dipartimento di Fisica di Purdue, insieme a studenti e docenti del progetto Quarknet [48], hanno ripetuto la misura storica di Victor Hess misurando il flusso dei raggi cosmici per mezzo di scintillatori a bordo di alcuni palloni aerostatici [23]. Analizzando i dati pubblicati, la variazione di flusso misurata si attesta intorno a un valore di 30%/km, leggermente più alto di quanto misurato dagli studenti del progetto EEE.

Infine, l'ultimo confronto con dati sperimentali è stato effettuato con i risultati ottenuti con il rivelatore CORAM, costruito per scopi didattici da un gruppo di ricercatori della Sezione INFN di Lecce e dell'Università del Salento [25]. Il rivelatore consiste in un telescopio di 4 scintillatori, che possono essere adoperati in coincidenza doppia, tripla o quadrupla. Il flusso dei raggi cosmici è stato misurato dal livello del mare fino a una quota di circa 1400 m s.l.m., ottenendo una variazione percentuale leggermente superiore al 20%/km.

A titolo didattico, abbiamo calcolato una media dei risultati sperimentali con cui stiamo effettuando il confronto (riportati nelle prime 6 righe della tabella II), ottenendo un valore di $(25 \pm 3)\%$ /km, simile al risultato ottenuto con le *Cosmic Boxes*.

Nel complesso dunque la variazione del numero di conteggi al secondo relativo ai cosmici secondari è confrontabile con quanto ottenuto da altri esperimenti didattici, tenendo conto della diversa dislocazione geografica della misura e degli apparati di rivelazione differenti.

TABELLA II. – *Variazione percentuale del flusso dei raggi cosmici secondari con l'altitudine, misurata con diversi apparati sperimentali. Le ultime 2 righe si riferiscono a risultati di simulazioni. Maggiori dettagli sono forniti nel testo.*

Misura	$\left(\frac{\Delta I}{I\Delta H}\right)$ [%/km]
Rossi <i>et al.</i>	17
Catania	18
Cosmos à l'École	37
Cosmix	27
Purdue	30
CORAM	20
Simulazioni COSMOS	20
Simulazioni AIRES	20

L'utilizzo di programmi di simulazione dedicati alla fisica degli sciami atmosferici estesi permette di effettuare un'ulteriore verifica dell'accuratezza della nostra misura. Nell'effettuare tale confronto bisogna ricordare che i programmi di simulazione possono differire per le parametrizzazioni adoperate nel descrivere il flusso, l'energia e la composizione dei raggi cosmici primari, per i modelli che descrivono la composizione dell'atmosfera e per le sezioni d'urto dei processi di interazione adronica.

Un primo confronto è stato effettuato facendo riferimento a delle simulazioni di protoni primari realizzate col programma COSMOS [49], che tiene conto di uno spettro realistico in energia e in direzione di arrivo dei cosmici primari [16]. Nei dati simulati è stato applicato un taglio pari a 9 GeV sulle energie dei protoni per tener conto della rigidità magnetica del luogo in cui sono stati simulati gli sciami (circa 37°, quindi simile alla latitudine di Erice, Segesta e Castellammare del Golfo). In queste condizioni si prevede che il flusso dei muoni cosmici varii del 20% in corrispondenza di una variazione di 1 km in altitudine, risultato leggermente più basso rispetto a quanto trovato dai nostri studenti.

Un ultimo confronto è stato realizzato con dati simulati con il generatore AIRES [50], ottenuti tenendo conto di uno spettro realistico di raggi cosmici primari costituiti da protoni, elio e nuclei più pesanti [51]. Il generatore AIRES include gli effetti geomagnetici del luogo in cui si simulano gli sciami, che nel caso specifico corrispondeva a una latitudine di circa 35°, in corrispondenza della quale era stato effettuato un volo di un pallone aerostatico con a bordo il rivelatore CAPRICE98, in grado di misurare il flusso dei muoni secondari. Sotto queste condizioni, il flusso simulato di muoni quasi verticali (cioè inclinati meno di 20° rispetto alla verticale) variava del 20% per ogni km di atmosfera attraversato, nella regione di altitudine di nostro interesse.

Entrambi questi risultati simulati (riportati nelle ultime 2 righe della tabella II) non sono lontani dal risultato sperimentale presentato in questo articolo.

Al fine di ampliare il lavoro svolto, si potrebbero realizzare misure aggiuntive a

quote più elevate, sfruttando l'orografia del nostro territorio nazionale e la distribuzione geografica delle scuole coinvolte nel progetto *EEE*. Oltre a questo, si prevede nel prossimo futuro di realizzare simulazioni dedicate, per tener conto delle specifiche del nostro apparato sperimentale e delle condizioni di lavoro in cui sono state svolte le misure, al fine di effettuare un confronto più accurato con i risultati ottenuti.

* * *

Si ringraziano tutti gli studenti e i docenti che partecipano al progetto *EEE*, che con entusiasmo contribuiscono quotidianamente alla riuscita di questo esperimento. Si ringraziano inoltre il CERN, l'INFN e la Fondazione e Centro di Cultura Scientifica "Ettore Majorana" per il continuo supporto fornito.

Bibliografia

- [1] WULF T., *Phys. Z.*, **10** (1909) 997.
- [2] WULF T., *Phys. Z.*, **11** (1910) 811.
- [3] PACINI D., *Ann. Uff. Centr. Meteor.*, **XXXII** (1910) parte I.
- [4] PACINI D., *Le Radium*, **T. VIII** (1911) 307.
- [5] PACINI D., *Il Nuovo Cimento*, **3** (1912) 93.
- [6] HESS V., *Phys. Z.*, **13** (1912) 1084.
- [7] HESS V., *Phys. Z.*, **14** (1913) 610.
- [8] ZANINI A., *Asimmetrie*, **10/9.10** (2010) 23.
- [9] BELLOTTI R. *et al.*, *Phys. Rev. D*, **53** (1996) 35.
- [10] BELLOTTI R. *et al.*, *Phys. Rev. D*, **60** (1999) 052002.
- [11] BOEZIO M. *et al.*, *Phys. Rev. D*, **62** (2000) 032007.
- [12] BOEZIO M. *et al.*, *Phys. Rev. D*, **67** (2003) 072003.
- [13] COUTU S. *et al.*, *Phys. Rev. D*, **62** (2000) 032001.
- [14] HAINO S. *et al.*, *Phys. Lett. B*, **594** (2004) 35.
- [15] AXANI S. N., CONRAD J. M. e KIRBY C., *Am. J. Phys.*, **85** (2017) 948.
- [16] BLANCO F., LA ROCCA P. e RIGGI F., *Eur. J. Phys.*, **30** (2009) 685.
- [17] <http://www.liceogioberti.it/didattica/prog.EEE.articoloCeresole.pdf>.
- [18] <http://www.varesenews.it/2012/07/viaggio-in-aliante-a-caccia-di-raggi-cosmici/84740/>.
- [19] https://www.nasa.gov/centers/glenn/technology/explorers_balloons.html.
- [20] https://www.i2u2.org/elab/cosmic/posters/display.jsp?type=paper&name=smokey_mountain_cosmic_ray_flux_altitude_study.data.
- [21] <https://indico.cern.ch/event/596002/contributions/2447173/>.
- [22] <https://indico.cern.ch/event/596002/contributions/2463935/>.
- [23] <http://www.physics.purdue.edu/outreach/quarknet/victor-hess.html>.
- [24] <https://www.aiaa.org/Secondary.aspx?id=17636>.
- [25] <http://cosmicrays.le.infn.it/Documenti/CORAM.scineghe1.pdf>.
- [26] "Balloon Flight Launches Cosmic Ray Education Project", *FERMINES*, **24** (2001) 12.
- [27] <http://eee.centrofermi.it>.
- [28] <http://www.centrofermi.it>.
- [29] <http://www.cern.ch>.
- [30] <http://home.infn.it>.
- [31] ABBRESCIA M. *et al.* (EEE COLLABORATION), *Eur. Phys. J. Plus*, **126** (2011) 61.
- [32] ABBRESCIA M. *et al.* (EEE COLLABORATION), *Eur. Phys. J. Plus*, **130** (2015) 187.
- [33] ABBRESCIA M. *et al.* (EEE COLLABORATION), *Nucl. Instrum. Methods A*, **816** (2016) 142.
- [34] ABBRESCIA M. *et al.* (EEE COLLABORATION), *Il Nuovo Cimento B*, **125** (2010) 243.
- [35] ABBRESCIA M. *et al.* (EEE COLLABORATION), *Eur. Phys. J. Plus*, **128** (2013) 148.
- [36] ABBRESCIA M. *et al.* (EEE COLLABORATION), *Eur. Phys. J. Plus*, **133** (2018) 34.

- [37] ABBRESCIA M. *et al.* (EEE COLLABORATION), *JINST*, **27** (2016) P0616.
 [38] ABBRESCIA M. *et al.* (EEE COLLABORATION), *Nucl. Instrum. Methods A*, **845** (2017) 383.
 [39] <http://ippog.org/>.
 [40] <http://www.centrofermi.it/monitor>.
 [41] <https://iatw.cnaf.infn.it/eee/elog/>.
 [42] COCCETTI F., DE GRUTTOLA D., GNESI I. e PILO F., *Giornale Fisica*, **2** (2016) 123.
 [43] <http://www.eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>.
 [44] <http://advansid.com/products/product-detail/asd-rgb-nuv-3s-p>.
 [45] BRUN R. *et al.*, CERN-DD-EE-84-1.
 [46] ROSSI B., HILBERRY N. e HOAG J. D., *Phys. Rev.*, **57** (1940) 461.
 [47] ROSSI B., *Rev. Mod. Phys.*, **20** (1948) 537.
 [48] <https://quarknet.org/>.
 [49] <http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/cosmosHome/index.html>.
 [50] SCIUTTO S. J., arXiv:astro-ph/9911331v1.
 [51] HANSEN P. *et al.*, arXiv:hep-ph/0307199v1.

Autori

Ricercatori

M. Abbrescia^{1,2}, C. Avanzini^{1,3}, L. Baldini^{1,3}, R. Baldini Ferroli^{1,4}, G. Batignani^{1,3}, M. Battaglieri^{1,17}, S. Boi^{1,8}, E. Bossini^{1,5}, F. Carnesecchi^{1,6}, A. Chiavassa^{1,7}, C. Cicalo^{1,8}, L. Cifarelli^{1,6}, F. Coccetti¹, E. Coccia^{1,9}, A. Corvaglia^{1,10}, D. De Gruttola^{1,11}, S. De Pasquale^{1,11}, F. L. Fabbri^{1,4}, V. Frolov¹⁶, L. Galante^{1,7}, P. Galeotti^{1,7}, M. Garbini^{1,6}, G. Gemme^{1,17}, I. Gnesi^{1,7}, S. Grazzi^{1,17}, C. Gustavino^{1,12}, D. Hatzifotiadou^{1,6,15}, P. La Rocca^{1,18}, G. Mandaglio^{1,19}, O. Maragoto Rodriguez¹⁴, G. Maron¹³, M. N. Mazziotta^{1,20}, S. Miozzi^{1,4}, R. Nania^{1,6}, F. Noferini^{1,6}, F. Nozzoli^{1,21}, F. Palmonari^{1,6}, M. Panareo^{1,10}, M. P. Panetta^{1,10}, R. Paoletti^{1,5}, W. Park¹⁴, C. Pellegrino^{1,6}, L. Perasso^{1,17}, F. Pilo^{1,3}, G. Piragino^{1,7}, S. Pisano^{1,4}, F. Riggi^{1,18}, G. C. Righini¹, C. Ripoli^{1,11}, M. Rizzi^{1,2}, G. Sartorelli^{1,6}, E. Scapparone^{1,6}, M. Schioppa^{1,22}, A. Scribano^{1,3}, M. Selvi^{1,6}, S. Serci^{1,8}, S. Squarcia^{1,17}, M. Taiuti^{1,17}, G. Terreni^{1,3}, A. Trifirò^{1,23}, M. Trimarchi^{1,23}, M. C. Vistoli¹³, L. Votano^{1,12}, M. C. S. Williams^{1,6,15}, L. Zheng^{1,14,15}, A. Zichichi^{1,6,15}, R. Zuyewski^{1,15}

(1) Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “Enrico Fermi”, Roma, Italy

(2) INFN and Dipartimento Interateneo di Fisica, Università di Bari, Bari, Italy

(3) INFN and Dipartimento di Fisica, Università di Pisa, Pisa, Italy

(4) INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati (RM), Italy

(5) INFN Gruppo Collegato di Siena and Dipartimento di Fisica, Università di Siena, Siena, Italy

(6) INFN and Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna, Bologna, Italy

(7) INFN and Dipartimento di Fisica, Università di Torino, Torino, Italy

(8) INFN and Dipartimento di Fisica, Università di Cagliari, Cagliari, Italy

(9) INFN and Dipartimento di Fisica, Università di Roma Tor Vergata, Roma, Italy

- (10) INFN and Dipartimento di Matematica e Fisica, Università del Salento, Lecce, Italy
- (11) INFN and Dipartimento di Fisica, Università di Salerno, Salerno, Italy
- (12) INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi (AQ), Italy
- (13) INFN CNAF, Bologna, Italy
- (14) ICSC World Laboratory, Geneva, Switzerland
- (15) CERN, Geneva, Switzerland
- (16) JINR Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
- (17) INFN and Dipartimento di Fisica, Università di Genova, Genova, Italy
- (18) INFN and Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Catania, Catania, Italy
- (19) INFN Sezione di Catania and Dipartimento di Scienze Chimiche, Biologiche, Farmaceutiche e Ambientali, Università di Messina, Messina, Italy
- (20) INFN Sezione di Bari, Bari, Italy
- (21) INFN and ASI Science Data Center, Roma, Italy
- (22) INFN and Dipartimento di Fisica, Università della Calabria, Cosenza, Italy
- (23) INFN Sezione di Catania and Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra, Università di Messina, Messina, Italy

Scuole

Ilaria Veronesi (Prof), Eduardo Gaudiosi, Giorgio Monteforte.

Liceo Scientifico P.S. Mancini, Via Lorenzo de Conciliis, 1, 83100 Avellino, Italia

Ilaria Iusco (Prof), Daniela Moretti, Marco Falotico.

Liceo Scientifico A. Scacchi, Corso Cavour, 241, 70121 Bari, Italia

Roberta Quadrio (Prof), Luca Melega, Sofia Musi.

Liceo Classico L. Galvani, Via Castiglione, 38, 40124 Bologna, Italia

Elisabetta Fioramonti (Prof), Antonella Bilotta, Eugenio Fissore.

Liceo G. Giolitti - G. B. Gandino, Via Fratelli Carando, 43, 12042 Bra (CN), Italia

Gianfranco Lazzaroli (Prof), Luca Ramo, Letizia Marini.

Liceo Scientifico Michelangelo, Via dei Donoratico, 09131 Cagliari, Italia

Ariella Gaias (Prof), Luca Melis, Daniele Orru.

Liceo Scientifico A. Pacinotti, Via Liguria, 9, 09121 Cagliari, Italia

Francesco Coccagna (Prof), Francesco Barone, Emanuele Bongiovanni.

Liceo Scientifico A. Volta, Via Martoglio Nino, 1, 93100 Caltanissetta, Italia

Michela Occhetto (Prof), Caterina Fracchia, Marco Rinaldi.

Liceo San Giuseppe Calasanzio, Piazza Calasanzio, 3, 17043 Carcare (SV), Italia

Domenico Liguori (Prof), Giovanni Affatato, Gennaro Salatino.

Liceo Scientifico S. Patrizi, Via Golia s.n.c., 87062 Cariati (CS), Italia

Andrea Calvagna (Prof), Edoardo Scarpaci, Martina Parlavecchio.

- ITIS S. Cannizzaro, Via Carlo Pisacane, 1, 95122 Catania, Italia*
Antonio Atalmi (Prof), Valeria Comito, Leonardo Sgroi.
- ITIS G. Marconi, Via Vescovo Maurizio, 82, 95126 Catania, Italia*
Alessandro Fantini (Prof), Nicole Pelaggi, Filiberto Canino.
- IIS E. Fermi, Via C. Pisacane, Contrada Giovino, Catanzaro Lido (CZ), Italia*
Riccardo Dossena (Prof), Oreste Danieli, Matteo Vailati Facchini.
- Liceo G. Novello, Viale Giovanni XXIII, 7, 26845 Codogno (LO), Italia*
Luca Parisi (Prof), Roberta Fulli, Maria Emilia Lucaci.
- ITI S. Cannizzaro, Via Consolare Latina, 263, 00034 Colleferro (RM), Italia*
Pelino Scenna (Prof), Valentina Daluiso, Francesco Marziali.
- Liceo Scientifico Temistocle Onesti, Viale dei Mille, 2, 63900 Fermo, Italia*
Enrico Purchi (Prof), Zaninni Caroleo, Simone Mostarda.
- ITT E. Fermi, Via Cesare Minardi, 14, 00044 Frascati (RM), Italia*
Alessandra Zanardelli (Prof), Alessia Pintossi, Enrico Belleri.
- IIS C. Beretta, Via Convento, 27, 25063 Gardone Val Trompia (BS), Italia*
Marinella Picchi (Prof), Paola Plebani, Francesco Omodei.
- IIS G. Antonietti, Via Paolo VI, 3, 25049 Iseo (BS), Italia*
Stafania Mercanti (Prof), Luciano Alessio Oddo, Elisa Bentifeci.
- Istituto L. Pirandello - Liceo Scientifico E. Majorana, Via Grecale, 92010 Lampedusa (AG), Italia*
Elena Evangelista (Prof), Giada Palumbo, Giulio Tondo.
- Liceo Classico Musicale G. Palmieri, Viale dell'Università, 12, 73100 Lecce, Italia*
Giuseppe Milanese (Prof), Francesca Bechere, Joshua Rhoden.
- Liceo Scientifico F. Enriques, Via della Bassata, 21, 57126 Livorno, Italia*
Maria Riccarda Miggiano (Prof), Anna Rosaria Manni, Salvatore Francesco Raffaele Montagna.
- Liceo Scientifico Leonardo da Vinci, Via Giovanni Gentile, 4, 73024 Maglie (LE), Italia*
Eugenio Chisari (Prof), Francesco Giuli Blanco, Enrico Milazzo.
- Liceo Scientifico E. Fermi, Corso del Popolo, 95047 Paternò (CT), Italia*
Carlo Colombini (Prof), Rebecca Dossena, Matteo Tagliaferri.
- Liceo Scientifico L. Respighi, Piazzale Genova, 1, 29121 Piacenza, Italia*
Daniela Budicin (Prof), Gagandeep Singh, Nicolò Lagata.
- IIS Giovanni da Vigo Recco - Nicoloso da Recco, Via Don Giovanni Minzoni, 1, 16035 Rapallo (GE), Italia*
Mariangela Jane Parmeggiani (Prof), Matteo Guerra, Federico Migani.
- Liceo Statale A. Serpieri, Via Sacramora, 52, 47922 Viserba (RN), Italia*
Viviana Amati (Prof), Matteo De Pietro, Francesca Margozzi.
- Liceo Classico P. Albertelli, Via Daniele Manin, 72, 00185 Roma, Italia*
Francesca Sartogo (Prof), Beatrice Cristalli, Livia Anna Jen Guttieres.
- Liceo Scientifico A. Righi, Via Boncompagni, 22, 00187 Roma, Italia*
Roberto Zingoni (Prof), Daniele Moscardini, Davide Germani.

Liceo Scientifico Francesco D'Assisi, Viale della Primavera, 207, 00172 Roma, Italia

Marco Nicastro (Prof), Francesco Colangelo, Giorgio Crescenzo.

Liceo Scientifico G. Da Procida, Via de Falco Gaetano, 2, 84126 Salerno, Italia

Giuseppe Filippini (Prof), Stefano Straccia, Sara Funari.

Liceo Scientifico B. Rosetti, Viale Alcide De Gasperi, 141, 63074 San Benedetto del Tronto (AP), Italia

Angela Vigna (Prof), Alice Cambiaso, Umberto Cascone.

Liceo Classico Chiabrera - Martini, Via Giovanni Caboto, 2, 17100 Savona, Italia

Antonio Canapini (Prof), Matteo Ordonzelli, Ouda Saloua.

IIS T. Sarrocchi, Via Carlo Pisacane, 3, 53100 Siena, Italia

Maurizio Cottino (Prof), Marco Giustetto, Daniele Monteleone.

Liceo Scientifico G. Ferraris, Corso Monteverchio, 67, 10129 Torino, Italia

Giovanni Nicco (Prof), Valentina Borghi, Giovanni Simon.

Liceo Scientifico A. Volta, Via Filippo Juvarra, 14, 10122 Torino, Italia

Fulvio Poglio (Prof), Lorenzo Sibille, Lorenzo Mathis.

Liceo Scientifico Gobetti Segrè, Via Maria Vittoria, 39 bis, 10123 Torino, Italia

Marcella Varone (Prof), Tizianamaria Quattrocolo, Elisa Slusarek.

IIS A. Einstein, Via Giovanni Pacini, 28, 10154 Torino, Italia

Elena Pizzinini (Prof), Francesco Oberosler, Alice Rossi.

Liceo Scientifico Leonardo da Vinci, Via Card. Cristoforo Madruzzo, 24, 38122 Trento, Italia

Maria Pezzo (Dirigente Scolastico).

Liceo Classico G. Prati, Via Santa Trinità, 38, 38122 Trento, Italia

Monica Nardin (Prof), Nicolas Baù, Elena Marengo.

Liceo Duca degli Abruzzi, Via Antonio Caccianiga, 5, 31100 Treviso, Italia

Giacomo di Staso (Prof), Francesco Lucio Di Niso, Annalisa Modugno.

IIS S. Staffa, Via Cappuccini, 23, 76015 Trinitapoli (BT), Italia

Cristiana Corona (Prof), Sara Gamba, Michele Gabrielli.

Liceo Scientifico Barsanti e Matteucci, Via IV Novembre, 151, 55049 Viareggio (LU), Italia

Michele Bianchi (Prof), Ilaria Tozzi, Melissa Micheli.

IIS Galilei - Artiglio, Via Aurelia Nord, 342, 55049 Viareggio (LU), Italia

David Merlin (Prof), Tommaso Bertola, Andrea Cornedi.

Liceo Scientifico G. B. Quadri, Viale Giosuè Carducci, 17, 36100 Vicenza, Italia