

FISICA PER TUTTI

Gli studenti del Progetto EEE sulle orme di Eratostene per la misura del raggio della Terra

The students of the EEE Project in the footprints of Eratosthenes to measure the Earth radius

Collaborazione EEE (*)

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

Riassunto. Il mondo della scuola e quello della ricerca condividono l'essenziale compito di formare le personalità scientifiche del paese volte a migliorare la società. Data la complessità via via crescente dell'attività scientifica non è semplice immaginare dall'esterno come si svolga la quotidianità professionale di un ricercatore. È dunque essenziale, per un ragazzo che si avvicini alla scelta di un percorso universitario, avere occasioni di sperimentare direttamente la realtà lavorativa di un ricercatore, così da poter scegliere in modo consapevole la strada da intraprendere. Il Progetto *Extreme Energy Events (EEE) - La Scienza nelle scuole* rappresenta un'iniziativa strategica: coinvolgendo direttamente ragazzi delle scuole superiori in un esperimento di fisica dei raggi cosmici, costituisce un punto di incontro tra scuola e ricerca. Il Progetto, coordinato dal *Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi"* di Roma, si articola su diverse iniziative; tra esse, incontri annuali in cui i ragazzi presentano il lavoro svolto e partecipano a specifiche attività volte a migliorarne la consapevolezza scientifica. In questo articolo, verrà presentata una di queste attività, svolta presso la *Fondazione e Centro di Cultura Scientifica "Ettore Majorana"* di Erice nel Maggio 2017: la misura del raggio terrestre con il metodo di Eratostene. Verrà anche brevemente discussa la rilevanza di tale misura nel percorso formativo degli studenti.

Abstract. One of the main goals of the school and research system is the education of future scientists. However, being hard to figure out what the daily life of a scientist is, it is mandatory for a high school student to evaluate a future university career, have chances to experience how a research activity is organized. The *Extreme Energy Events (EEE) - La Scienza nelle scuole* project plays, in this context, an essential role: involving high school students in a cosmic-ray experiment, offers them such an opportunity. The Project, coordinated by the Italian *Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi"* in Rome, is organized in different activities. Among them, annual meetings where students present their work and take part in initiatives finalized to increase their

(*) Lista completa in coda all'articolo.

scientific knowledge. In this paper, one of such activities will be discussed, performed at the *Fondazione e Centro di Cultura Scientifica “Ettore Majorana”* in Erice on May 2017 and finalized to the measurement of the Earth radius with the Eratostene method.

1. Introduzione

Il Progetto *Extreme Energy Events (EEE) - La Scienza nelle scuole* [1] rappresenta l'attività di punta del *Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “Enrico Fermi”* di Roma [2], un ente di ricerca italiano finalizzato a svolgere attività di ricerca nei settori più avanzati della fisica. In aggiunta alla missione puramente scientifica, il Centro Fermi svolge un'essenziale attività di disseminazione della scienza: quest'ultima riveste infatti un ruolo irrinunciabile nella sensibilizzazione della società verso la ricerca e verso una maggiore consapevolezza dei metodi scientifici usati. In questo ambito, il Progetto EEE, svolto in collaborazione con il CERN (*Conseil européen pour la recherche nucléaire*), l'INFN (*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*) e il MIUR (*Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca*) si propone in una duplice veste: rappresenta un moderno esperimento di fisica delle alte energie, volto alla rivelazione e allo studio dei raggi cosmici e, allo stesso tempo, coinvolge gli studenti delle scuole superiori nella costruzione e nella gestione di apparati sperimentali e nella successiva fase di analisi dei dati raccolti [3, 4].

I raggi cosmici sono costituiti in prevalenza da nuclei di elementi comuni prodotti in eventi astrofisici, quali ad esempio le supernove, in regioni di spazio galattiche o extragalattiche. Essi sono caratterizzati da energie fino a tre ordini di grandezza maggiori rispetto a quelle prodotte oggi nei moderni acceleratori [5]. Quando entrano nell'atmosfera terrestre, interagiscono con essa e producono i raggi cosmici secondari; una buona parte di quelli che arrivano a terra sono costituiti da muoni. In EEE i muoni vengono rivelati mediante delle *Multigap Resistive Plate Chamber* (MRPC) [6], dei moderni rivelatori a gas di concezione simile a quelli utilizzati nell'esperimento ALICE [7] installato al CERN [8]. I telescopi vengono installati nelle scuole aderenti e affidati agli insegnanti e ai ragazzi che quotidianamente ne monitorano le prestazioni (cfr. fig. 1). Ogni telescopio ha come referente un ricercatore del Centro Fermi, cui i ragazzi fanno capo nello svolgimento della loro attività scientifica. Attualmente, sono coinvolte nel progetto 105 scuole (cfr. fig. 2). Gli istituti dotati di telescopio si occupano principalmente del monitoraggio diretto delle prestazioni del rivelatore, mentre i rimanenti partecipano all'attività di monitoraggio mediante gli strumenti di *Data Quality Monitor* online messi a disposizione dal Centro Fermi. La rete EEE consta al momento di 59 stazioni (di cui 7 in laboratori INFN) e, ricoprendo un'area che si estende da Ginevra a Catania su una superficie di più di 500000 km², rappresenta il più esteso osservatorio di raggi cosmici basato sugli MRPC attualmente esistente. Le informazioni provenienti dai diversi telescopi vengono confrontate e combinate, ricercando possibili correlazioni temporali che suggeriscano l'origine comune dei raggi cosmici secondari osservati. Una delle indagini più rilevanti nella fisica dei raggi cosmici è infatti, al momento, la ricerca di correlazioni a lunga distanza (*Long Distance*



Fig. 1. – Foto di un telescopio del Progetto EEE installato presso il Liceo “M. D’Azeglio” di Torino.

Correlations, LDC) [9]: essa si propone di individuare un’origine comune nei raggi cosmici secondari rivelati da stazioni distanti decine o a volte centinaia di chilometri, imputabile, ad esempio, alla frantumazione di un nucleo primario in prossimità del Sole attraverso l’interazione con un fotone di quest’ultimo (*foto-disintegrazione*). Quest’ultimo processo è piuttosto raro: attraverso le simulazioni si stima una frequenza a terra degli eventi prodotti attraverso di esso dell’ordine di $10^{-3} \div 10^{-1}$ per km^2 per anno (cfr. [9] e le referenze in esso riportate); nel processo vengono prodotti due frammenti che, giungendo nell’atmosfera, si convertono in due sciame secondari. La memoria dell’origine comune viene preservata nell’informazione temporale: gli sciame originati nell’atmosfera esibiranno infatti una correlazione temporale, arrivando sulla Terra distanziati da un breve intervallo di tempo. Un’altra caratteristica di tali eventi è la direzione degli sciame secondari: al fine di identificarne l’origine comune, è infatti essenziale valutarne il parallelismo tenendo, ad esempio, in considerazione la curvatura terrestre. Al fine di sensibilizzare gli studenti alla problematica, durante la Conferenza Nazionale del Progetto EEE, tenuta dal 29 al 31 maggio 2017 presso la *Fondazione e Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana* di Erice, è stata or-



Fig. 2. – Distribuzione delle stazioni EEE sul territorio nazionale e al CERN. I pallini rossi rappresentano scuole che ospitano telescopi della rete EEE, quelli arancioni telescopi ospitati presso il CERN, Sezioni INFN o Dipartimenti di Fisica, e quelli azzurri scuole che partecipano al monitoraggio e all'analisi dei dati raccolti.

ganizzata una campagna di misure volta a replicare la misura di Eratostene, in cui i ragazzi, supervisionati dai ricercatori del Centro Fermi, hanno misurato il raggio terrestre secondo la metodologia proposta dal pensatore greco.

2. L'esperimento di Eratostene

Tra il terzo e il secondo secolo a.C., Eratostene riuscì a misurare la lunghezza del meridiano terrestre mediante un metodo basato sull'osservazione dell'altezza solare sull'orizzonte. Quest'ultima veniva stimata a partire dall'ombra proiettata a terra da uno gnomone, cioè un'asta che proietti la propria ombra su una superficie piana. La misura venne svolta in due città, Siene (oggi Assuan) ed Alessandria, separate da una distanza di 840 km [10]. Nella stima del raggio, Eratostene assunse che le due città si trovassero sullo stesso meridiano, vero solo approssimativamente. La prima si trova in prossimità del tropico del Cancro e, già al tempo, era stato osservato



Fig. 3. – Rappresentazione schematica della misura di Eratostene. Nell'immagine, Siene ha il Sole allo Zenit, mentre l'angolo al centro della Terra corrisponde all'angolo ω citato nel testo (pari a $7,2^\circ$ nel caso di Siene ed Alessandria).

che, in corrispondenza del solstizio d'Estate, il sole risultava allo zenith e quindi illuminava il fondo dei pozzi. Tra le assunzioni utilizzate nell'esperienza, c'era quella della sfericità della Terra e del parallelismo tra i raggi solari all'arrivo sulla superficie terrestre (cfr. fig. 3). A partire da tali premesse, confrontando l'angolo di incidenza (rispetto allo zenith) dei raggi solari nelle due città e conoscendo la distanza d_{SA} tra esse, era possibile stimare il raggio terrestre R_T . Effettuando infatti la misura quando il sole si trovava allo zenith rispetto a Siene, in quest'ultima città i raggi solari risultavano perfettamente ortogonali alla superficie terrestre. Essi formavano invece un angolo ω diverso da zero ad Alessandria; tale angolo, essendo i raggi solari paralleli, risultava pari all'angolo al centro formato dai raggi che uniscono il centro della Terra con le due città. Dalla semplice definizione di angolo al centro in una circonferenza, risulta

$$(1) \quad d_{SA} = \omega R_T,$$

dove ω è espresso in radianti. Risultando l'angolo ω misurato pari a $7,2^\circ$ (corrispondente a 0,13 radianti), per il raggio terrestre venne stimato un valore di circa 6200 km ⁽¹⁾, molto prossimo alla misura attuale compresa tra 6378 e 6357 km a seconda che si consideri il raggio equatoriale o polare [11].

⁽¹⁾ Non esistono opere scritte prodotte da Eratostene che ne riportino i risultati. Si fa qui pertanto riferimento alla fonte più prossima, i *Coelestia di Cleomede* [12], che riporta come risultato dell'esperienza 250000 stadi (altre fonti parlano di 252000 stadi). Inoltre, la conversione del risultato in chilometri risulta affetta da una grande incertezza, non essendo noto con precisione a quali dei tanti stadi Eratostene si riferisse nel proprio esperimento (cfr. discussione in [13, 14]).

3. L'esperimento di Erice

A differenza dell'esperimento di Eratostene, che si svolse in corrispondenza dei solstizi e che si basava sull'assunzione che Siene ed Alessandria giacessero sullo stesso meridiano, l'esperimento qui descritto sfrutta le migliori conoscenze geografiche oggi disponibili. La stima dell'elevazione —che corrisponde alla distanza angolare dall'orizzonte del segmento che unisce l'osservatore con l'oggetto astronomico osservato— è stata effettuata il 30 maggio 2017, nell'istante del passaggio del Sole al meridiano locale delle diverse città coinvolte, coincidente con il momento di massima elevazione ⁽²⁾. Le distanze tra le città che compaiono nella stima del raggio in eq. (1) corrispondono quindi alla lunghezza dell'arco di meridiano individuato dai paralleli su cui esse giacciono, d_{EEE} . Al fine di replicare la misura di Eratostene, gli studenti hanno utilizzato una strumentazione di uso comune: un'asta in legno di lunghezza $L = 120$ cm con estremità a sezione circolare leggermente smussata ai bordi (cfr. fig. 4), un cellulare *smartphone* con installata un'applicazione *Livella a bolla* per valutare l'orizzontalità delle superfici considerate (fig. 4), una coppia di squadre per verificare e mantenere la verticalità dell'asta e la pavimentazione della città di Erice, usata come superficie piana e orizzontale su cui misurare la lunghezza l_{ombra} della proiezione dell'ombra. Per quest'ultimo aspetto, alla misura effettiva è stata fatta precedere una campagna di ricognizione dei ricercatori del Centro Fermi, volta a valutare l'adeguatezza della zona scelta alle esigenze della misura. Essendo la stima del raggio terrestre basata sulle misure dell'altezza del sole in due diverse città (Siene e Alessandria nel caso di Eratostene), parallelamente alla campagna di misure realizzata ad Erice sono state effettuate misure analoghe in altre città del Nord Italia: Lodi, Torino, Treviso e Milano. Per la misura, gli studenti sono stati suddivisi in 21 gruppi, ognuno composto da due scuole, come riportato in tabella I. Delle misure di confronto effettuate nel Nord Italia si sono fatti carico gli istituti scolastici riportati in tabella II. La misura si è svolta, innanzitutto, individuando la zona di maggiore planarità ed orizzontalità del terreno utilizzato come superficie di proiezione mediante la livella a bolla, e posizionando quindi l'asta in verticale attraverso l'uso combinato di squadre e livella, utilizzate sia per il posizionamento effettivo che per la verifica della verticalità durante la misura. La lunghezza dell'ombra è stata misurata utilizzando un metro a nastro. La misura è stata replicata più volte nei minuti immediatamente precedenti e successivi alla culminazione solare. La media delle misure effettuate è stata usata come stima della lunghezza dell'ombra. Il rapporto tra la lunghezza dell'ombra l_{ombra} e quella dell'asta L corrisponde alla tangente dell'angolo tra la direzione del sole e lo zenith, che è stato quindi calcolato mediante la relazione

$$\omega = \arctan\left(\frac{l_{ombra}}{L}\right).$$

⁽²⁾ L'istante di massima elevazione è stato calcolato attraverso il sito <https://www.sunearthtools.com/it/tools/distance.php>.



Fig. 4. – Telefono cellulare e squadra vengono utilizzati per stimare l'orizzontalità del piano su cui viene proiettata l'ombra e la perpendicolarità dell'asta usata come gnomone.

L'angolo complementare, pari all'elevazione (o altezza) solare, si può quindi ricavare attraverso

$$\theta = \arctan \left(\frac{L}{l_{\text{ombra}}} \right).$$

4. Analisi dei dati

I dati raccolti nella campagna di misure sono stati analizzati durante l'ultimo giorno della conferenza insieme con gli studenti, al fine di rendere questi ultimi consapevoli della trattazione statistica cui vengono sottoposti i risultati delle procedure

TABELLA I. – *Elenco e composizione dei 21 gruppi partecipanti alla misura del raggio terrestre ad Erice.*

Gruppo	Località	Istituto
GR01	Frascati (RM)	Istituto Salesiano Villa Sora
	Milano	Liceo Scientifico Statale V. Veneto
GR02	Altamura (BA)	IISS Nervi Galilei
	Lodi	IIS A. Volta
GR03	Trapani	Liceo Scientifico V. Fardella
	Lanciano (CH)	Liceo Scientifico “Galileo Galilei”
GR04	Saluzzo (CN)	Liceo Scientifico G. B. Bodoni
	L’Aquila	IIS “Andrea Bafle”
GR05	Cagliari	Liceo Scientifico L. B. Alberti
	Ancona	Liceo Scientifico G. Galilei
GR06	Parma	Liceo Scientifico G. Marconi
	Reggio Calabria	Liceo Scientifico A. Volta
GR07	Torino	Liceo Classico M. d’Azeglio
	Palermo	Liceo Scientifico Benedetto Croce
GR08	Lecce	Liceo Scientifico G. Banzi Bazoli
	Monterotondo (RM)	Liceo Scientifico Statale G. Peano
GR09	Ancona	Liceo Classico C. Rinaldini
	Moncalieri (TO)	IIS Majorana-Marro
GR10	L’Aquila	ITIS Amedeo D’Aosta
	Quartu Sant’Elena (CA)	IIS Primo Levi
GR11	Lodi	Liceo Scientifico G. Gandini
	Castevetrano (TP)	IISS “Cipolla - Pantaleo - Gentile”
GR12	Korce	Gjinnazi “Themistokli Germenji”
	Torino	Liceo Scientifico G. Bruno
GR13	Palermo	Liceo Classico G. Garibaldi
	Reggio Emilia	IIS L. Nobili
GR14	Bologna	Liceo Scientifico E. Fermi
	Potenza	Liceo Scientifico Pier Paolo Pasolini
GR15	Voghera (PV)	IIS “A. Maserati”
	Altamura (BA)	Liceo Statale Cagnazzi
GR16	Teramo	IIS Alessandrini - Marino - Forti
	Petralia Sottana (PA)	IIS Pietro Domina
GR17	Lecce	IIS E. Fermi
	Roma	Liceo Scientifico C. Cavour
GR18	Arezzo	ITIS Galileo Galilei
	Bitetto (BA)	Liceo Statale “E. Amaldi”
GR19	Roma	ITIS H. Hertz
	Palermo	ITI Vittorio Emanuele III
GR20	Salerno	Liceo Statale “Regina Margherita”
	Parabiago (MI)	Liceo Scientifico Claudio Cavalleri
GR21	Grosseto	Rete Scuole della Cittadella dello Studente - IIS A. Manetti
	Osimo (AN)	IIS Corridoni Campana

TABELLA II. – *Elenco delle scuole che hanno effettuato la misura di Eratostene nel Nord Italia.*

Località	Istituto
Torino	Liceo Scientifico G. Bruno
Treviso	Liceo Duca degli Abruzzi
Lodi	IIS A. Volta
Milano	Liceo Scientifico Statale V. Veneto

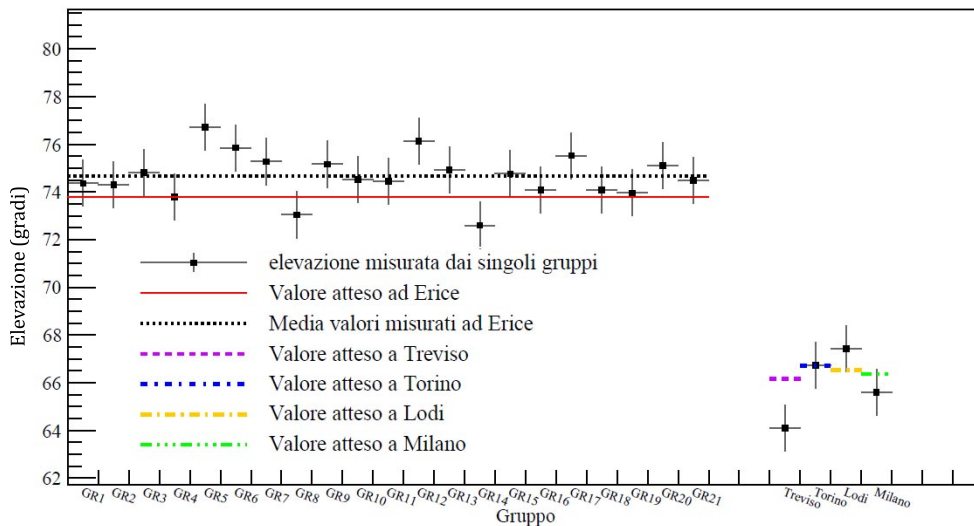


Fig. 5. – Risultati della misura dell’altezza solare rilevata dai 21 gruppi di Erice e dai 4 gruppi del Nord Italia (punti in basso a destra nel grafico). Le incertezze associate ad ogni misura corrispondono alla σ della distribuzione stimata attraverso il fit gaussiano in fig. 6. Le linee orizzontali sono descritte nella legenda.

sperimentali. Ognuno dei 21 gruppi ha prodotto una stima dell’elevazione solare ad Erice. I risultati sono riportati in fig. 5. Al fine di estrarre il raggio terrestre, i 21 valori di elevazione misurati ad Erice sono stati combinati attraverso una media aritmetica. L’incertezza associata a questa media è data dal rapporto tra la deviazione standard σ delle $N = 21$ misure divisa per \sqrt{N} (*errore sulla media di N misure*). La media μ delle misurazioni ottenute ad Erice e la corrispondente deviazione standard σ sono state stimate analizzando la distribuzione delle N misure riportata in fig. 6, estraendo il valore di μ e σ attraverso un fit gaussiano. Il risultato ottenuto è di $(74,69 \pm 0,21)^\circ$, ed è rappresentato dalla linea tratteggiata in fig. 5. La linea rossa continua rappresenta invece il valore dell’elevazione atteso ad Erice. La deviazione standard stimata attraverso il fit riportato in fig. 6 è interpretabile come la distanza media rispetto al valor vero di una singola misura, ed è quindi stato utilizzato come

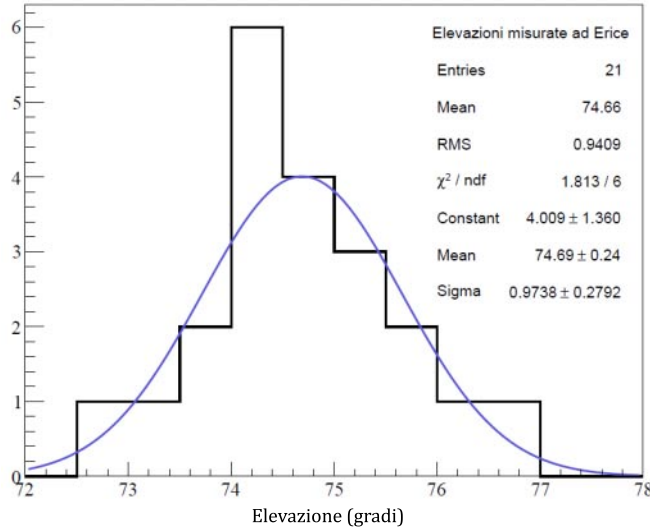


Fig. 6. – Distribuzione delle 21 misure effettuate ad Erice con il corrispondente fit gaussiano. I parametri ottenuti dal fit sono riportati nella leggenda. La deviazione standard della Gaussiana che descrive la distribuzione, $\sigma = 0,97^\circ$, è utilizzata come estimatore della deviazione standard su una singola misura, ed è quindi associata come errore alle singole misure effettuate sia ad Erice sia nelle scuole del Nord.

errore sulle singole misure delle scuole, e come tale è stato applicato sia alle misure effettuate ad Erice che a quelle effettuate nelle scuole del Nord.

Per ricavare il raggio terrestre, R_T , l'elevazione ottenuta ad Erice è stata combinata con i valori misurati nelle scuole del Nord Italia (cfr. tabella II) secondo la formula

$$(2) \quad R_T = \frac{d_{EEE}}{\Delta\omega},$$

dove $\Delta\omega$ indica la differenza, in radianti, fra le elevazioni solari misurate nei due siti mentre d_{EEE} rappresenta la distanza tra i paralleli passanti per essi ⁽³⁾. In fig. 7 sono riportati i risultati relativi alla stima del raggio terrestre: i quattro punti sperimentali —quadrati rossi— rappresentano i risultati ottenuti combinando la misura di Erice con le misure effettuate a Treviso, Torino, Lodi e Milano. Le linee tratteggiate e punteggiate rappresentano invece, rispettivamente, il valore attuale del raggio terrestre [11] e il valore misurato da Eratostene. Gli errori associati ai raggi sono calcolati attraverso la propagazione dell'errore statistico, includendo in essa le incertezze associate ai diversi termini che compaiono nell'eq. (2), cioè l'incertezza associata alla

⁽³⁾ Per quanto riguarda la distanza d_{EEE} , essa è stata stimata mediante il tool online <https://www.sunearthtools.com/it/tools/distance.php>, che fornisce la distanza tra due siti geografici con un'incertezza percentuale dello 0,3%. Le coordinate dei diversi edifici sono state ottenute attraverso *Google Maps*, inserendo l'indirizzo ufficiale degli istituti. L'incertezza dello 0,3% è stata utilizzata nella formula di propagazione dell'errore statistico citata nel relativo paragrafo.

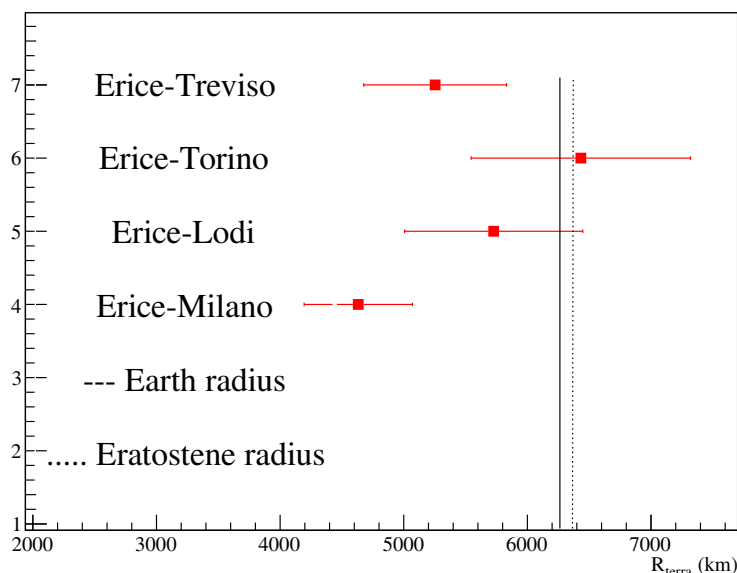


Fig. 7. – Misura del raggio terrestre ottenuta combinando l'elevazione stimata ad Erice con quella ottenuta nei quattro siti del Nord Italia (quadrati rossi). Le linee tratteggiate e punteggiate rappresentano invece, rispettivamente, il valore attuale del raggio terrestre [11] e il valore stimato da Eratostene.

stima dell'elevazione, descritta nella sezione precedente, e l'incertezza associata alla stima d_{EEE} della distanza tra i due siti considerati.

5. Sorgenti di incertezze sistematiche

Come emerge dai risultati riportati in fig. 7, due delle quattro misure risultano compatibili con il valore atteso, mentre due se ne discostano sottostimando leggermente il raggio terrestre. Al fine di meglio interpretare i risultati ottenuti e il discostarsi dei valori misurati da quelli attesi, è importante analizzare le possibili sorgenti di errori sistematici presenti nella misura.

Un primo scostamento può essere originato da una non perfetta orizzontalità del piano utilizzato durante la misura. Al fine di stimare questo effetto, è stato valutato l'errore sulla stima dell'elevazione solare per una generica misura durante la quale il palo sia stato tenuto perpendicolare ad un terreno che presentasse un'inclinazione generica. Ad un'inclinazione del piano di un grado corrisponde infatti uno spostamento nell'elevazione misurata di qualche frazione di grado nella direzione di una sovrastima di tale angolo. Un'altra possibile sorgente di incertezza sistematica è data dal carattere non perfettamente liscio della superficie di appoggio: la granulosità del terreno può infatti aver indotto angoli spuri sia nella sistemazione dell'asta per la proiezione dell'ombra, sia nella valutazione dell'orizzontalità di esso attraverso il posizionamento a terra del telefono e l'utilizzo dell'applicazione livella a bolla. Infine, una misura

non sufficientemente accurata della lunghezza effettiva dell'asta, che può essere stata eseguita in diversi punti dell'estremità, potrebbe aver indotto effetti ulteriori.

Sebbene solo il primo effetto (non orizzontalità del terreno) contribuisca ad una deviazione della misura nella direzione osservata, anche gli altri effetti elencati potrebbero dare un contributo non nullo. Se da una parte, infatti, ogni gruppo ha replicato più volte la misura della lunghezza dell'ombra, altre valutazioni come quella dell'orizzontalità del terreno mediante il posizionamento del cellulare o della lunghezza dell'asta sono state effettuate solo una volta per ciascun gruppo. Nella discussione finale in aula, l'esame critico dei risultati ottenuti e degli effetti sistematici sopra riportati ha rappresentato un momento importante, in quanto ha portato a riflettere su come ottimizzare le condizioni operative nelle quali realizzare l'esperimento.

6. Conclusioni

L'esperienza di misura vissuta ad Erice, al di là del semplice risultato che ben si confronta con i valori misurati da Eratostene e il valore attualmente riconosciuto, ha avuto indubbiamente anche una forte valenza didattica e di approccio alla misura scientifica. Gruppi eterogenei di studenti, provenienti da diverse regioni italiane e da realtà geografiche distanti, hanno cooperato verso un obiettivo comune, confrontandosi sulle metodologie e sull'analisi dei dati raccolti, e comparando in maniera critica i risultati ottenuti, sia in termini di valore assoluto che di precisione del risultato. Il confronto tra gruppi che effettuano una medesima misura ha permesso ai ragazzi di apprezzare, in prima persona, il ruolo della riproducibilità di un risultato sperimentale, elemento fondante del metodo scientifico. La misura qui presentata è parte di una esperienza su scala maggiore che fa del progetto EEE un esempio unico al mondo, in cui un sofisticato esperimento di fisica delle particelle è realizzato con la partecipazione attiva di studenti e docenti delle scuole superiori italiane. Il successo di questo approccio è testimoniato dalle cento e più scuole partecipanti al progetto e dalle nuove richieste continuamente in arrivo.

Bibliografia

- [1] ZICHICHI A., "La Scienza nelle scuole" EEE - Extreme Energy Events.
- [2] Centro Fermi web site: <http://www.centrofermi.it/eee>.
- [3] EEE COLLABORATION, "EEE Project - Students from all parts of peninsula collaborate to study cosmic rays" *Proc. Sci.*, **314** (2017) 823.
- [4] EEE COLLABORATION, "Come varia il flusso di raggi cosmici con la quota? Basta chiederlo agli studenti del progetto EEE" *Giornale di Fisica*, **LIX** (2018) 229.
- [5] BLÜMERA J., ENGELA R. e HÖRANDEL J. R., *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **63** (2009) 293.
- [6] EEE COLLABORATION, "Extreme Energy Events Project: construction of the detectors" *Proc. Sci.*, **314** (2017) 820.
- [7] ALICE COLLABORATION (K. AAMODT *et al.*), "The ALICE experiment at the CERN LHC" *JINST*, **3** (S08002) 2008.
- [8] <https://home.cern/>.

- [9] ABBRESCIA M. *et al.*, “Search for long distance correlations between extensive air showers detected by the EEE network” *Eur. Phys. J. Plus*, **133** (2018) 34. doi:10.1140/epjp/i2018-11898-x
- [10] *Arc. Hist. Exact Sci.*, **17** (1987) 359.
- [11] https://it.wikipedia.org/wiki/Raggio_terrestre.
- [12] CLEOMEDE, *De motu Circulari Corporum Caelestium*, a cura di R. B. TOOD, col titolo di *Caelestia* (BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft) 1990.
- [13] RUSSO LUCIO, *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna* (Feltrinelli) 1996, cap. 9.2.
- [14] WEINBERG S., *To explain the world*, p. 75.

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. Hatzifotiadiou^{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, 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

Maria Rosaria Cornacchia (Prof.), Francesco Schiavariello, Giusi Langiulli.

Liceo Statale Cagnazzi, Piazza Zanardelli 30, 70022 Altamura (BA), Italia

Giovanni Cavallera (Prof.), Antonio Laurieri, Mattia Ciaccia.

IISS Nervi-Galilei, Viale Padre Pio da Pietralcina, 70022 Altamura (BA), Italia

Schiavoni Sandra (Prof.), Roberto Maria Duca, Ludovica Giacconi.

Liceo Classico C. Rinaldini, Via Canale 1, 60125 Ancona, Italia

Laura Polenta (Prof.), Luca Sampaolesi, Davide Rinaldoni, Chiara Cortese.

Liceo Scientifico G. Galilei, Via S. Allende Gossens, 60131 Ancona, Italia

Marco Capaccioli (Prof.), Gabriele Spatola, Carolina Rosadini.

ITIS Galileo Galilei, Via Dino Menci, 1, 52100 Arezzo, Italia

Francesco Cirrottola (Prof.), Angela Cea, Samuele Norino Ciaccio.

Liceo Scientifico E. Amaldi, Via Abbruzzese, 38, 70020 Bitetto (BA), Italia

Elisa Bressan (Prof.), Riccardo Aleotti, Lorenzo Siddi.

Liceo Scientifico E. Fermi, Via Mazzini, 172, 40139 Bologna, Italia

A. M. Cristina Fois (Prof.), Michela Lusso, Sabrina Ortu.

Liceo Scientifico L. B. Alberti, Viale Cristoforo Colombo, 37, 09125 Cagliari, Italia

Francesco Ferreri (Prof.), Michele Antonio Lanzoni, Salvatore Scorsone.

IISS "Cipolla - Pantaleo - Gentile" - Piazzale Placido Rizzotto, 91022 Castelvetro (TP), Italia

Valerio Bonacquisti (Prof.), Tiziano Ortolani, Arianna Rossi.

Istituto Salesiano Villa Sora, Via Tuscolana, 5, 00044 Frascati (RM), Italia

Fabrizio Pettini (Prof.), Lorenzo Ceccotti, Lorenzo Davitti.

Rete Scuole della Cittadella dello Studente - IIS A. Manetti, Via Brigate Partigiane 19, 58100 Grosseto, Italia

Mirela Jaupi (Prof.), Joana Kuruni, Klerisa Cule.

Gjimnazi "Themistokli Germenji", Kor, Albania

Tiziana Torriero (Prof.), Cesare Di Luca, Andrea Melchiorre.

Liceo Scientifico "Galileo Galilei" Via Don Minzoni, 11, 66034 Lanciano (CH), Italia

Antonella Matarese (Prof.), Giammarco Cafaggi, Kenneth Abalu.

IIS "Andrea Bafle", Via Acquasanta, 16, 67100 L'Aquila, Italia

Sara Rotellini (Prof.), Federico Alfonsetti, Jacopo Guetti.

I.I.S. Amedeo d'Aosta, Via Acquasanta, 5, 67100 L'Aquila, Italia

Anna Rita Lorenzo (Prof.), Giorgio Pastore, Vittoria De Matteis.

Liceo Scientifico G. Banzi Bazoli, Piazza Palio, 63, 73100 Lecce, Italia

Fabio Calvani (Prof.), Andrea Giannotta, Giulia Delle Donne.

IIS E. Fermi, Via Merine, 5, 73100 Lecce, Italia

Abele Bianchi (Prof.), Irene Ferranti, Broglia Andrea.

Liceo Scientifico G. Gandini, Viale Giovanni XXIII, 1, 26900 Lodi, Italia

Fabio Pincioli, Silvia Betti (Erice). Attilio Grassotti (Prof.), Lincastri Salvatore, Caredda Caterina, 18 alunni classe 1LSB, Perniola Rocco, Howlader Farid Farhana (Lodi).

IIS A. Volta, Viale Giovanni XXIII, 9, 26900 Lodi, Italia

Elena Servida (Prof.), Cristina Re (Prof.), India Ermacora, Michele Maria Mainoli, Luca Ferretti (Erice). Francesca Calgaro (Prof.), classe 4H, Riccardo Capsoni (Milano).

Liceo Scientifico Statale Vittorio Veneto, Via Angelo de Vincenti, 7, 20148 Milano, Italia

Claudia Camagna (Prof.), Filippo Scicolone, Fabio Scovazzi.

IIS Majorana-Marro, Via Ada Negri, 14, 10024 Moncalieri (TO), Italia

Anna Tiscioni (Prof.), Claudia Giammarini, Maria Francesca Erardi.

Liceo Scientifico Statale G. Peano, Via della Fonte, 9, 00015 Monterotondo (RM), Italia

Ido Borsini (Prof.), Alessandro Strappato, Davide Baiocco.

IIS Corridoni Campana, Via Molino Mensa, 60027 Osimo (AN), Italia

Vincenzo La Rosa (Prof.), Giuseppe Motisi, Mario Lauriano.

Liceo Scientifico Benedetto Croce, via Benfratelli, 4, 90134 Palermo, Italia

Maria Grazia Meli (Prof.), Chiara Pecoraro, Giuliana Madonna.

Liceo Classico G. Garibaldi, Via Canonico Rotolo, 2, 90143 Palermo, Italia

Dino Coglitore (Prof.), Giuseppe Ganci, Gabriele Musso.

ITI Vittorio Emanuele III, Via Duca della Verdura, 48, 90143 Palermo, Italia

Giovanni Guido (Prof.), Davide Vallenzasca, Samuel Nebuloni.

Liceo Scientifico Claudio Cavalleri, Via Giovanni Spagliardi, 23, 20015 Parabiago (MI), Italia

Cristina Marconi (Prof.), Ivan De Biasi, Riccardo Raschi.

Liceo Scientifico G. Marconi, Via della Costituente, 6, 43125 Parma, Italia

Mario Richiusa (Prof.), Giuseppe D'Acquisto (Prof.), Riccardo Li Pira, Manuel Gulino.

IIS Pietro Domina, Piazza Domina, 22, 90027 Petralia Sottana (PA) - Sezione distaccata Petralia Soprana, Italia

Adele De Rosa (Prof.), Francesca Mangone, Dario Loprete.

Liceo Scientifico Pier Paolo Pasolini, Via Anzio, 85100 Potenza, Italia

Sandra Fiori (Prof.), Alessandra Olla, Sofia Luisa Quagliano.

IIS Primo Levi, Strada Comunale Pitz'E Serra, 09045 Quartu Sant'Elena (CA), Italia

Carmen Petronio (Prof.), Domenico Benedetto, Ignazio Mate.

Liceo Scientifico A. Volta, Via San Sperato, 89133 Reggio Calabria, Italia

Claudia Bonetti (Prof.), Marco Menniti, Daniel Vigliotti.

IIS L. Nobili, Via Makall, 10, 42124 Reggio Emilia, Italia

Giuseppe Ciancio (Prof.), Davide De Santis, Mattia De Cristoforo.

ITIS H. Hertz, Via Walter Procaccini, 70, 00173 Roma, Italia

Angela Antonucci (Prof.), Francesco Gargiulo, Stefano Bae.

Liceo Scientifico C. Cavour, Via delle Carine, 1, 00184 Roma, Italia

Marilena Loia (Prof.), Maria Carmen Falivene, Tatiana Tumbarello.

Liceo Statale "Regina Margherita", Via Giovanni Cuomo, 6, 84122 Salerno, Italia

Francesca Quagliotti (Prof.), Giacomo Riberi, Andrea Caldera.

Liceo Scientifico G. B. Bodoni, Via Donaudi, 24, 12037 Saluzzo (CN), Italia

Riccardo Chiuicchi (Prof.), Alessio Paesani, Blerton Seljami

IIS Alessandrini - Marino Forti, Via San Marino, 12, 64100 Teramo, Italia

Beniamino Vicino (Prof.), Gaia Gavello, Martina Menghini.

Liceo Classico M. d'Azeglio, Via Giuseppe Parini, 8, 10121 Torino, Italia

Fabrizio Pusceddu (Prof.), Carola Macchia, Chiara Macario (Erice). Andreotti

Claudia, Deferre Gianluca, Fabbri Tommaso, Lombardozzi Christian, Maccarrone Emanuele, Maccarrone Lorenzo, Massa Nicol, Quaglia Federico (Torino).

Liceo Scientifico G. Bruno, Via Gino Marinuzzi 1, 10156 Torino, Italia

Filippo De Vincenzi (Dirigente Scolastico), Leonardo Carpinteri (Prof.), Francesca

Saladino (Prof.), Anna Trapani (Assistente di Fisica) Angelica Noto, Leonardo Napoli.

Liceo Scientifico V. Fardella, Via Giuseppe Garibaldi, 83, 91100 Trapani, Italia

Monica Nardin (Prof.), Nicolas Bau', Saverio Cavasin (Treviso).

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

Chiara Invernizzi (Prof.), Andrea Frassone (Prof.), Luca Mantuano, Jacopo Messina.

IIS "A. Maserati", Via Mussini, 22, 27058 Voghera (PV), Italia