

*Niccolò Porciani*

*Liceo Scientifico Barsanti e Matteucci*  
*5<sup>a</sup>A*

*Esame di Stato*

*a.s. 2016 - 2017*

# *“A caccia di muoni”*

## *Niccolò Porciani - 5A*

In questa tesina ho scelto di parlare dei raggi cosmici e dell'esperimento di Rossi e Hall, che ha ispirato la realizzazione del piccolo esperimento presentato nella seconda parte. Parlerò infine delle applicazioni pratiche della misura del flusso di muoni cosmici.

### **I raggi cosmici:**

A inizio '900, in seguito alle prime scoperte sulla radioattività, se ne iniziarono a studiare le fonti naturali, tra cui si individuò la presenza di elementi radioattivi nel suolo. La rilevazione di radiazione anche con apparati schermati dalle fonti note condusse però a investigare altre possibilità, e fu Victor Franz Hess, nel 1912, a misurare i livelli di radiazione a diverse altitudini, mostrando che essi diminuivano nella regione più vicina al suolo, per poi aumentare nuovamente con l'altitudine. Tale misura, insieme alla verifica dell'indipendenza dell'intensità di questa radiazione dalla posizione del sole, portò Hess a teorizzare l'esistenza di una “radiazione cosmica” proveniente da fonti esterne al sistema solare. Per questo merito Hess fu insignito del Premio Nobel per la Fisica nel 1936.

Oggi sappiamo che la radiazione rilevata da Hess proviene principalmente dai cosiddetti raggi cosmici, particelle e nuclei sufficientemente stabili provenienti da fonti esterne al sistema solare. Essi si distinguono in primari e secondari, costituiti rispettivamente da particelle ed elementi prodotti abbondantemente dalla nucleosintesi stellare (ad esempio elettroni, protoni, He, C, O e Fe), e da elementi e particelle (ad esempio antiprotoni, positroni, Li, Be e B) prodotti principalmente dall'interazione dei primari con il gas interstellare.\* (Nota: L'origine dei raggi cosmici primari non è ancora del tutto compresa, anche se una valida ipotesi sembra essere che essi siano costituiti da particelle accelerate all'interno dei cosiddetti “supernova remnants (SNRs)”, ovvero i resti derivanti dall'esplosione di supernove. Tale ipotesi non è comunque in grado di spiegare l'esistenza dei raggi cosmici più energetici, che si ipotizza provengano da altre fonti esterne alla Via Lattea.)

La componente rilevante ai fini dell'esperimento realizzato è costituita dai nucleoni (di cui circa il 79% sono protoni liberi e circa il 15% fanno parte di nuclei di elio), che attraversando l'atmosfera terrestre interagiscono con le molecole dell'aria e generano una cascata di particelle, principalmente pioni, che a loro volta decadono producendo raggi gamma, elettroni, positroni, muoni e neutrini. Tali particelle, alcune delle quali possono nuovamente decadere o interagire con l'atmosfera, giungono a terra, e possono essere rilevate.

\* Alcuni raggruppano le categorie finora citate sotto la denominazione di “primari”, e intendono con “secondari” le particelle prodotte dall'interazione dei primari con l'atmosfera terrestre

## L'esperimento di Rossi Hall:

L'esperimento che ho deciso di realizzare è stato ispirato da quello realizzato da Bruno Rossi e David B. Hall nel 1941, sulla misura del decadimento dei muoni (allora noti come "mesotroni") derivanti dai raggi cosmici.

In tale esperimento Rossi e Hall utilizzarono un apparato composto da cinque tipologie di rivelatori e vari spessori di piombo per distinguere i muoni con una quantità di moto rientrante in un preciso intervallo (tra circa 310 MeV/c e circa 450 MeV/c) dai muoni con quantità di moto superiore. Le misure furono realizzate sia a Denver (1616m s.l.m.) che ad Echo Lake (3240m s.l.m.) introducendo, per alcune misure ad Echo Lake, uno spessore di ferro di 200 g/cm<sup>2</sup>. Dato il fattore di conversione di 1,23 per le perdite dovute alla ionizzazione tra ferro ed aria, tale spessore di ferro era circa equivalente ai 147 g/cm<sup>2</sup> d'aria presenti tra le due località. In assenza di decadimenti dei muoni, quindi, si sarebbe dovuto misurare nei due casi lo stesso flusso per i muoni con la quantità di moto scelta.

Come Rossi e Hall si aspettavano il flusso misurato a Echo Lake con lo spessore di ferro fu invece superiore a quello misurato a Denver senza spessore; infatti, per quanto le perdite dovute alla ionizzazione siano effettivamente uguali nei due casi, durante il tragitto in aria i muoni decadono, mentre il tragitto nel ferro è sufficientemente breve perché i decadimenti siano trascurabili.

Rossi e Hall confrontarono poi sia il flusso di muoni con  $310 \text{ MeV}/c \leq p \leq 450 \text{ MeV}/c$  sia il flusso di muoni con  $p \geq 450 \text{ MeV}/c$  nelle due località, e verificarono che il flusso di muoni con quantità di moto minore diminuisce molto più rapidamente di quello dei muoni con quantità di moto maggiore. Tali misure sono in accordo con la teoria della relatività ristretta di Einstein, secondo cui, per effetto della dilatazione temporale, muoni con quantità di moto (e quindi velocità) maggiore decadono in un tempo medio più lungo. In prima approssimazione, trascurando le perdite di ionizzazione tra le due località, si ha:

$$N(t) = N_0 e^{(-t/\tau_{\text{eff}})}$$

$$\tau_{\text{eff}} = \tau_{\text{proprio}} * \gamma(v)$$

$$t = \Delta h / v$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow N(h_{\text{inf}}) &= N(h_{\text{sup}}) e^{[-\Delta h / (\tau_{\text{eff}} * v)]} \\ &= N(h_{\text{sup}}) e^{[-\Delta h / (\tau_{\text{proprio}} * \gamma(v) * v)]} \end{aligned}$$

Quando invece una previsione classica darebbe semplicemente:

$$N(h_{\text{inf}}) = N(h_{\text{sup}}) e^{[-\Delta h / (\tau_{\text{proprio}} * v)]}$$

I dati ottenuti nelle misure di Denver e Echo Lake sono descritti in modo molto migliore dalla previsione relativistica, e fornirono quindi una verifica sperimentale della relatività.

Rossi e Hall calcolarono inoltre, sulla base delle loro misure, il tempo di dimezzamento  $\tau_{\text{proprio}}$  del muone, ottenendo un valore di 2,4  $\mu\text{s}$ , piuttosto vicino a quello oggi accettato di circa 2,19  $\mu\text{s}$ .

## Il mio esperimento:

Ho deciso di realizzare un esperimento ispirato a quello di Rossi e Hall, per quanto meno raffinato nell'esecuzione, misurando il flusso di muoni a tre diverse altitudini, per cercare di verificarne la presenza e il decadimento. tramite un kit ottenuto gentilmente in prestito da CAEN S.p.a..

### Apparato sperimentale:

L'apparato utilizzato per le misure è composto da:

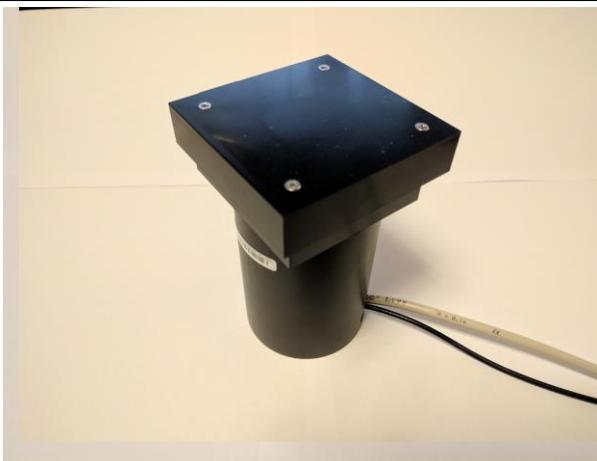
- scintillatore plastico ("tile") (4,7cm x 4,7cm x 1cm), costituito da un materiale scintillante a base di polistirene;
- fotomoltiplicatore al silicio ("SiPM") (6mm x 6mm);
- Power Supply and Amplification Unit ("PSAU") (CAEN modello SP5600);
- Desktop Digitizer ("digitalizzatore") (CAEN modello DT5720A);
- computer portatile per la presa dati;
- spessore di piombo (equivalente a circa 3cm)



Scintillatore plastico (tile)



Fotomoltiplicatore (SiPM)



Tile a contatto con il SiPM

Rivelatore completo



PSAU (sopra) e digitalizzatore (sotto)



Spessore di piombo

### **Principio di funzionamento:**

Quando una particella carica attraversa la tile, essa cede energia agli elettroni delle molecole della tile stessa per interazione elettromagnetica. Gli elettroni del materiale scintillante vengono quindi eccitati e, nel ritornare allo stato fondamentale, emettono luce (circa nella lunghezza d'onda del violetto); per lo scintillatore utilizzato il tempo caratteristico di questa emissione è di pochi nanosecondi, e la riemissione dell'energia ceduta dalla particella carica avviene quindi in un tempo molto breve. Una parte della luce emessa nella tile passa, attraverso uno strato di grasso ottico, nel SiPM, costituito da celle, ciascuna delle quali presenta un semiconduttore con una giunzione p-n. Quando un fotone è assorbito da un elettrone nella zona di svuotamento della giunzione, esso genera una coppia elettrone-lacuna; i due portatori di carica così generati sono accelerati in direzioni opposte dal campo elettrico applicato alla giunzione, e nelle giuste condizioni acquisiscono energia sufficiente per interagire con altri elettroni, generando nuove coppie elettrone-lacuna. Si ha quindi un effetto a cascata con la creazione di un grande numero di portatori di carica, che creano una corrente ai capi della cella; tale corrente viene rilevata e la cella risulta "accesa".

D'altra parte l'eccitazione termica del semiconduttore nelle celle del SiPM può causare la creazione spontanea di coppie elettrone-lacuna, che danno quindi origine a "cascate spurie"; tale problematica non è direttamente eliminabile, ma può essere aggirata introducendo una soglia minima perché il segnale proveniente dal SiPM venga considerato come evento effettivo: così facendo si considerano come eventi reali solo attivazioni "contemporanee" (ovvero in tempo abbastanza breve da avere una sovrapposizione tra i segnali) di un numero sufficientemente alto di celle. Poiché la produzione di cascate spurie è casuale, la probabilità che  $N$  celle siano attivate contemporaneamente da cascate spurie decresce molto rapidamente con  $N$ , mentre il passaggio di una particella genera un numero piuttosto alto di fotoni e quindi di celle attivate. Si può quindi imporre una soglia relativamente alta, abbattendo notevolmente il contributo del rumore termico e influenzando in modo trascurabile la rilevazione di segnali reali.

In pratica, ciò è realizzato rimuovendo la tile dall'apparato e misurando la frequenza degli eventi rilevati (in questo caso detta "Dark Count Rate" o DCR) in funzione della soglia scelta, e ripetendo tale misura in presenza della tile; la soglia da utilizzare per compiere la misura

effettiva deve essere sufficientemente alta perché il DCR risulti trascurabile rispetto alla frequenza dei conteggi in presenza della tile.

### **Procedura sperimentale:**

L'apparato sopra descritto è stato utilizzato per misurare il flusso (in  $\text{Hz m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ) di muoni in tre diverse località, a tre diverse altitudini:

- Pietrasanta (loc. Marinella),  $43^{\circ}56'01''\text{N}$ ,  $10^{\circ}13'33''\text{E}$ , altitudine 3m;
- Abetone (centro città),  $44^{\circ}08'44''\text{N}$ ,  $10^{\circ}39'53''\text{E}$ , altitudine 1380m;
- Monte Gomito (rifugio dell'ovovia),  $44^{\circ}07'40''\text{N}$ ,  $10^{\circ}38'38''\text{E}$ , altitudine 1886m;

Si sono presentate tre problematiche principali nell'effettuare le misure:

- Presenza di conteggi derivanti dalla componente "molle" dei raggi cosmici, costituita da elettroni e positroni; si è cercato di aggirare il problema introducendo uno spessore di piombo sopra il rivelatore: poiché la massa del muone è di circa  $10\text{MeV}/c^2$  mentre quella dell'elettrone è di circa  $511\text{KeV}/c^2$  gli elettroni risentono molto più fortemente delle interazioni, e i muoni sono quindi in grado di penetrare molto più in profondità in uno spessore di piombo di quanto non lo siano gli elettroni. Lo spessore di piombo utilizzato, corrispondente a circa 3cm, è stato limitato dalla disponibilità effettiva del materiale.
- Possibile dipendenza dell'efficienza del rivelatore dalla temperatura, che si è però dimostrata trascurabile rispetto alle altre fonti di errore: sono state infatti eseguite misure preliminari facendo variare la temperatura del sensore tra  $25^{\circ}\text{C}$  e  $29^{\circ}\text{C}$ , e non è stata evidenziata particolare correlazione tra temperatura e flusso misurato (coefficiente angolare della retta di regressione circa  $-0,05 \text{ Hz/K}$ ,  $R = -0,26$ )
- Presenza di forte rumore, probabilmente di natura elettromagnetica, durante le misure sul Monte Gomito; si è cercato di aggirare il problema introducendo una spira nel cavo di collegamento tra il SiPM e l'elettronica di controllo e aggiustando la soglia per tenere conto della nuova componente nel rumore di fondo.

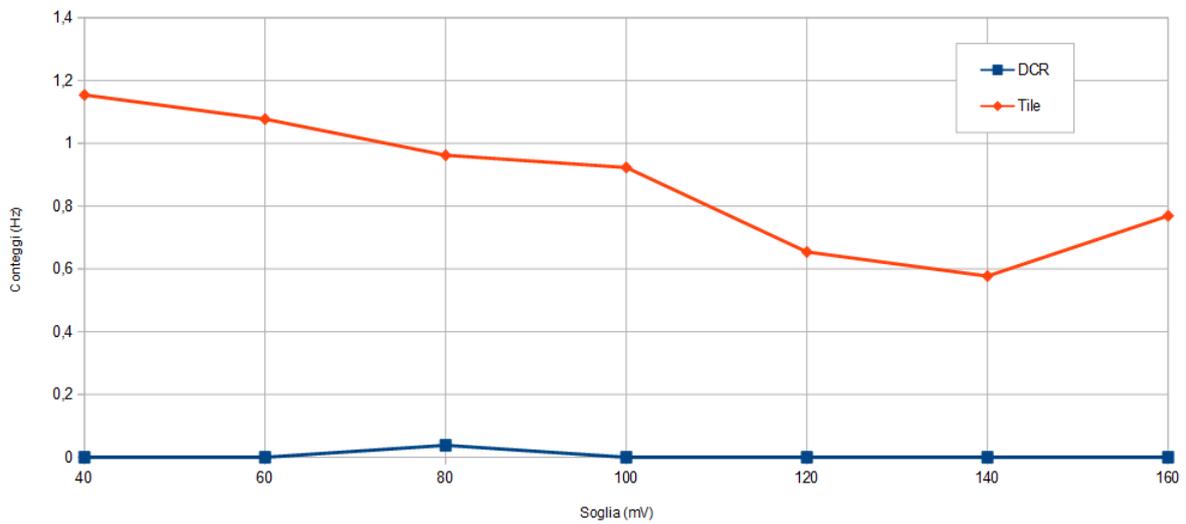
Per ciascuna località è stata eseguita una calibrazione dell'apparato, misurando il DCR e i conteggi in presenza della tile in funzione della soglia. Basandosi su tale calibrazione si è poi scelto un intervallo per i valori di soglia da utilizzare durante le misure, e si sono raccolte due serie di 16 misure ciascuna. Ogni misura di ogni serie risulta a sua volta dalla media, eseguita automaticamente, di 20 misure di 1,3 secondi ciascuna (la durata delle singole misure è stata imposta da limitazioni hardware nel digitalizzatore). Si riporta infine la media dei valori misurati e la deviazione standard del campione.

**Pietrasanta:**

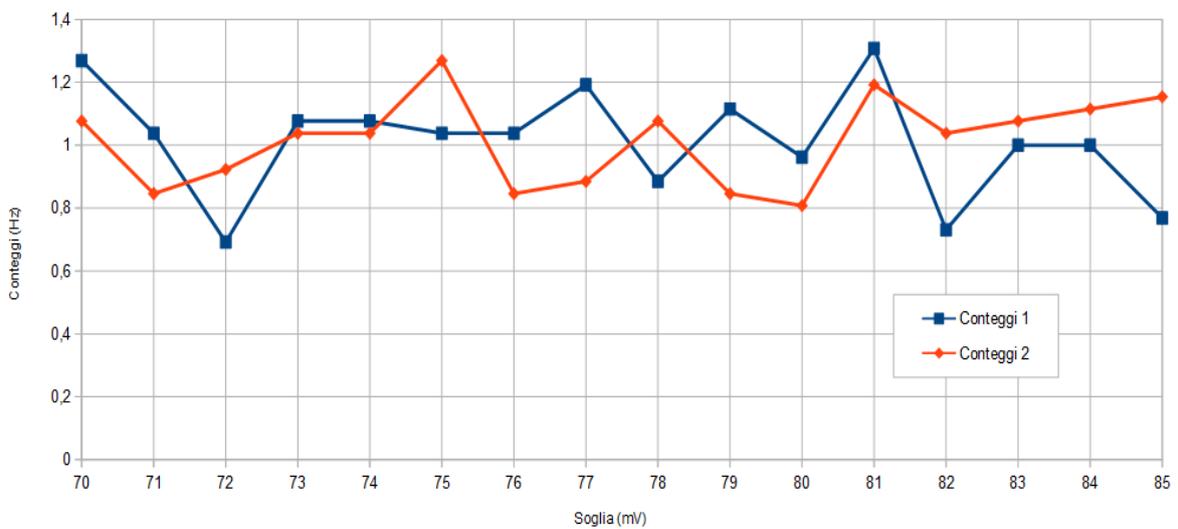
La misura in questa località è stata effettuata a circa 3m sul livello del mare. La calibrazione della soglia non ha presentato particolari problematiche, con un livello di rumore molto basso. Si è scelta una soglia tra 70 e 85 mV ma sono state effettuate misure anche a 135-150 mV; infatti, nonostante la calibrazione avesse mostrato un impatto anche sui conteggi in presenza della tile per una soglia così alta, si è preferito ottenere anche dati con la stessa soglia utilizzata sul Monte Gomito.

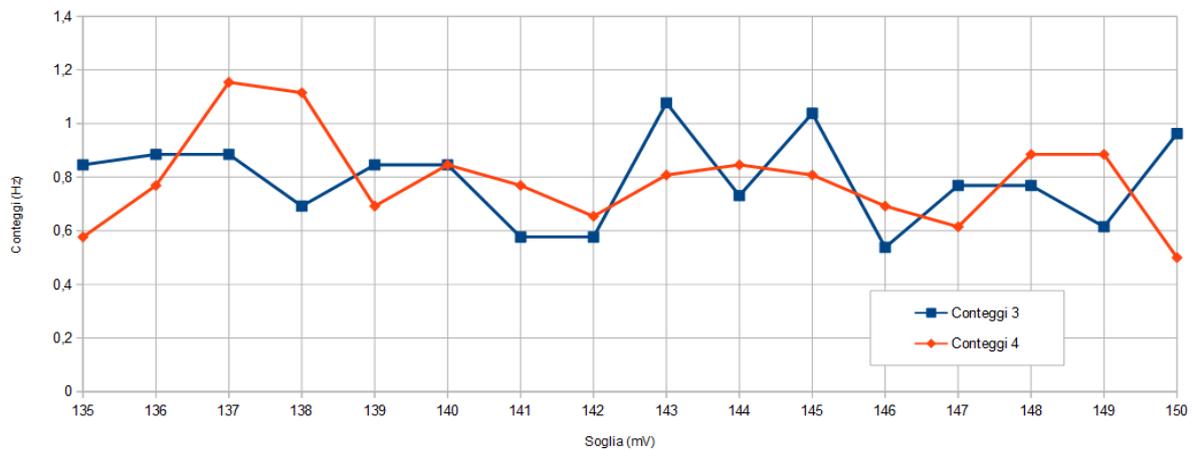


A seguito il grafico con le misure di calibrazione:



E i grafici con le misure effetti





Per l'intervallo di soglia 70 mV – 85 mV si ha:

Media = 1,01 Hz

Deviazione Standard del campione = 0,14 Hz

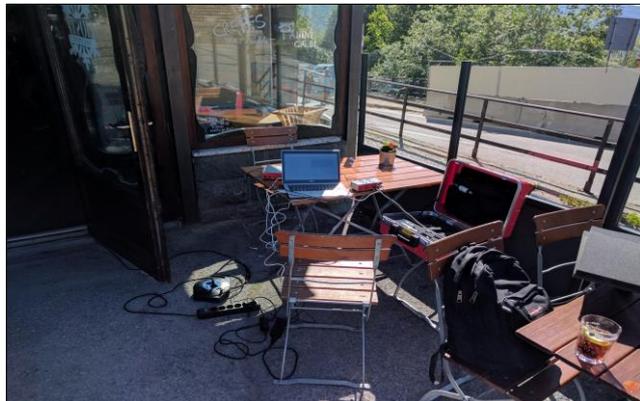
Per l'intervallo di soglia 135 mV – 150 mV si ha:

Media = 0,79 Hz

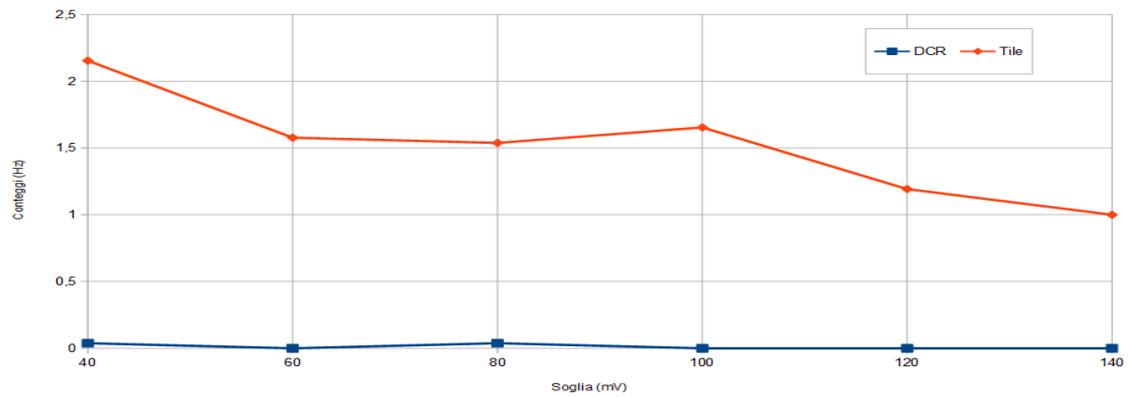
Deviazione Standard del campione = 0,17 Hz

**Abetone:**

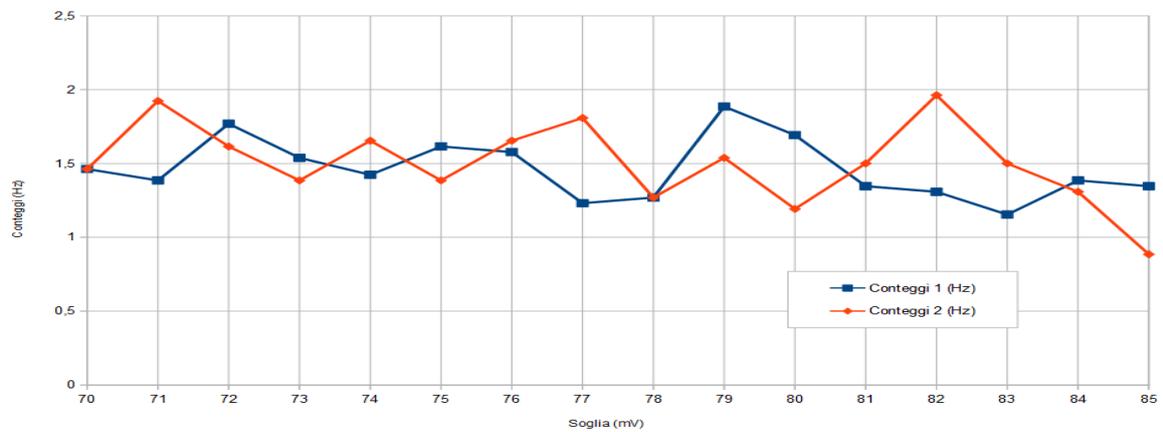
La misura in questa località è stata eseguita a circa 1380m sul livello del mare. La calibrazione della soglia non ha presentato particolari problematiche, con un livello di rumore piuttosto basso; si è quindi scelta una soglia di circa 70-80 mV.



A seguito il grafico con le misure di calibrazione:



E il grafico con le misure effettive:



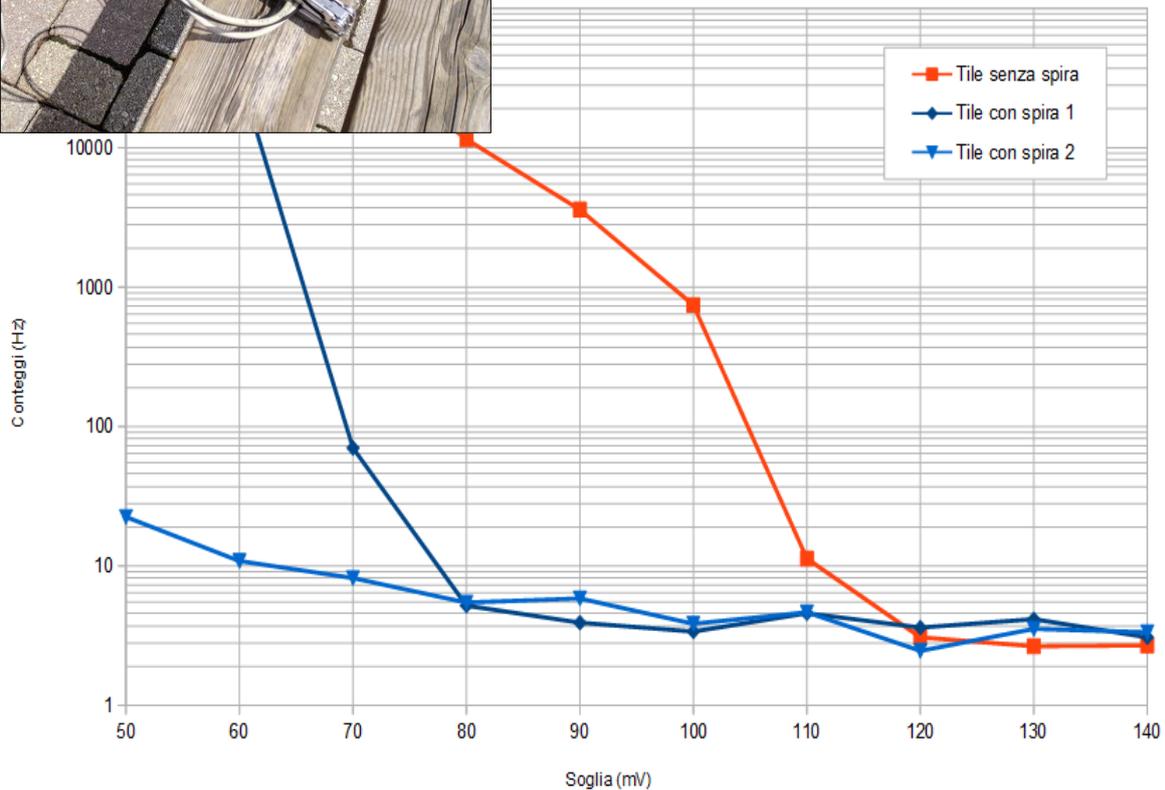
Si ha:

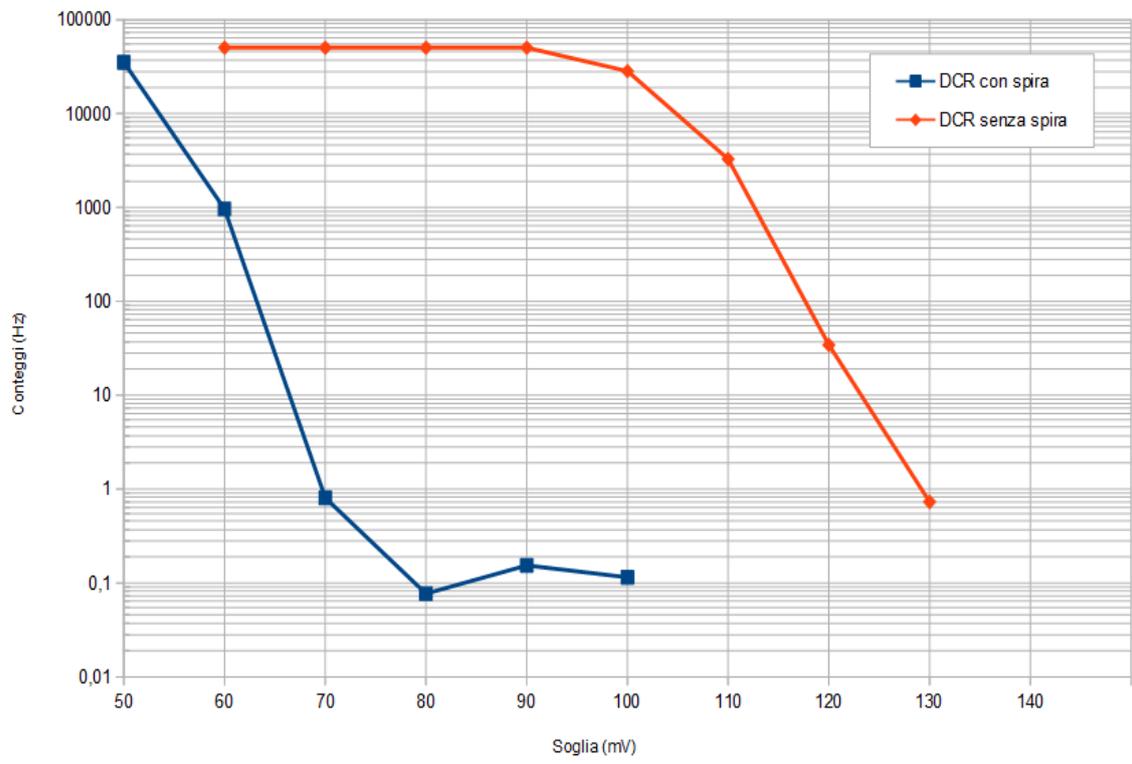
Media = 1,48 Hz

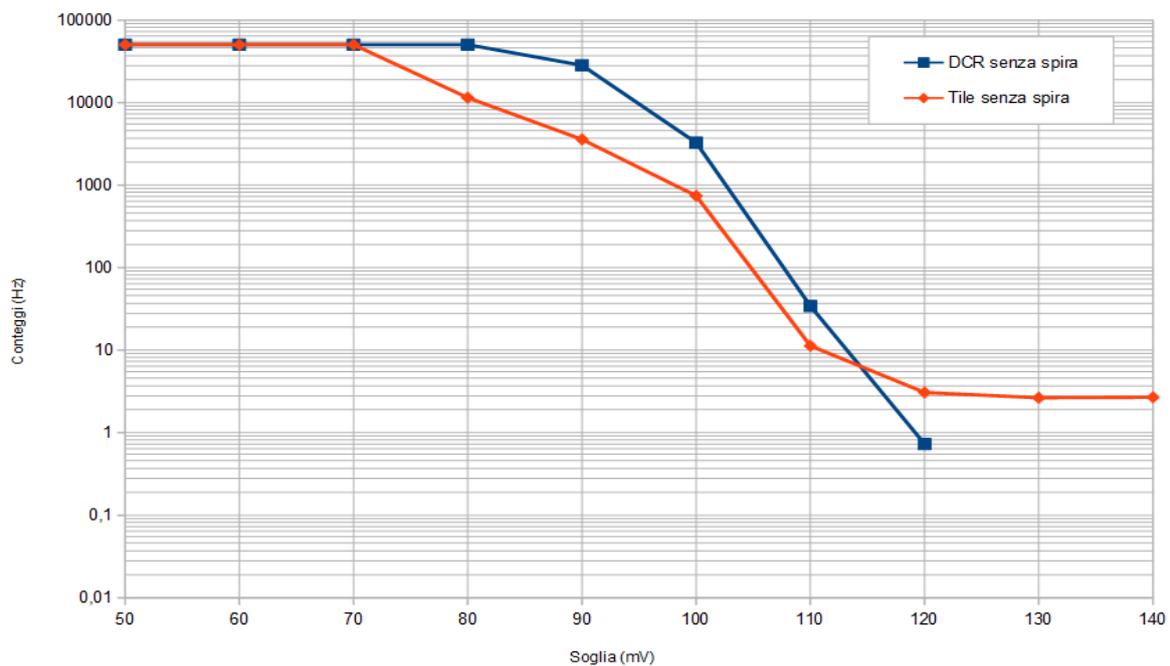
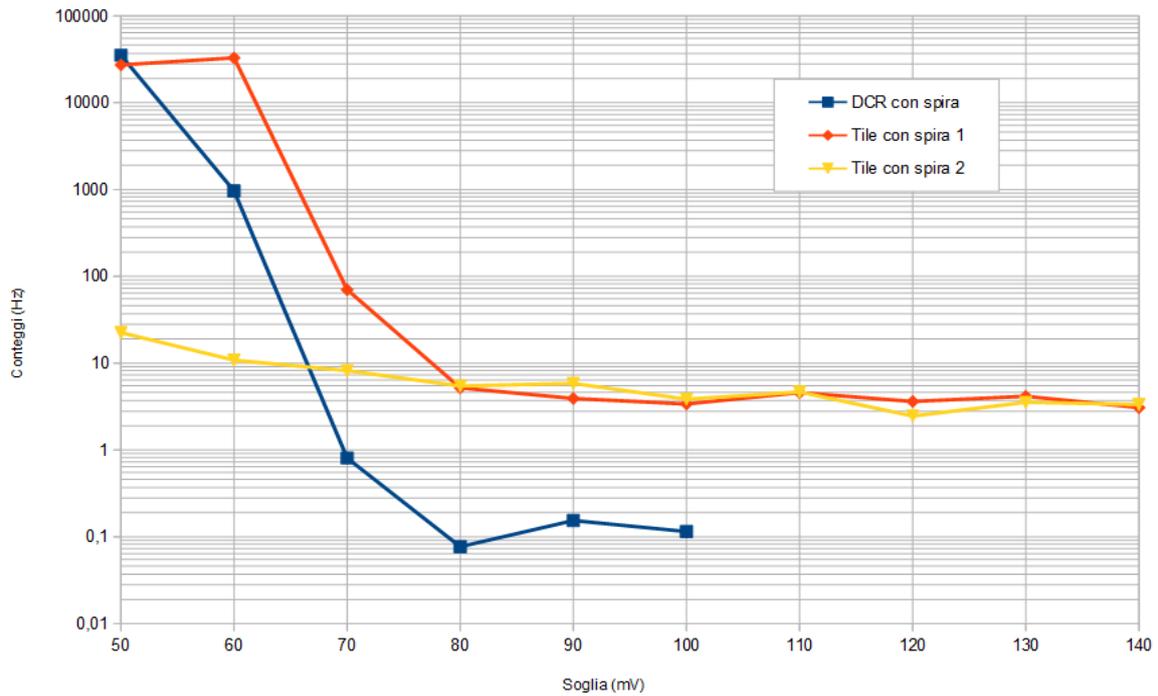
Deviazione Standard del campione = 0,24 Hz

**Monte Gomitto:**

La misura in questa località è stata eseguita a 1886m sul livello del mare. La calibrazione della soglia è stata piuttosto problematica a causa della presenza di un forte rumore di fondo, non attribuibile ai conteggi spuri di natura termica. Si è ipotizzata una natura elettromagnetica di tale rumore, probabilmente dovuta alla vicinanza della telecabina Casa Cantoniera – Monte Gomito (utilizzata per raggiungere il luogo di misura) e dell'annesso rifugio. Per tentare di ridurre il rumore a livelli accettabili si è introdotta una spira nel cavo di presa dati (vedi foto in basso) e, come si evince dai grafici a seguito, la soluzione adottata pare essere stata efficace

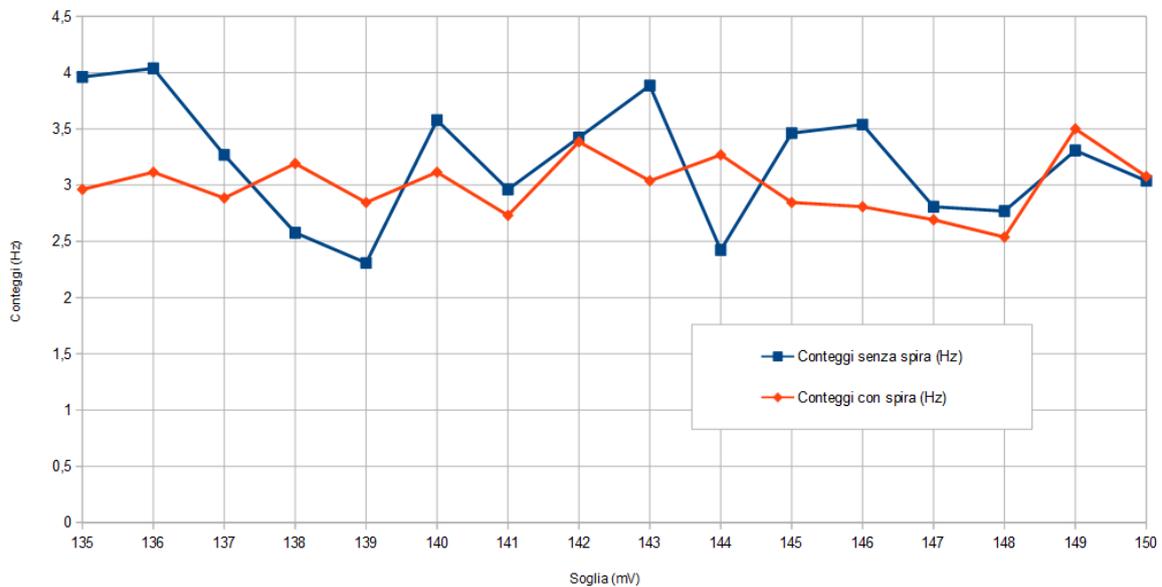






Da tali grafici si evince che il rumore è fortemente attenuato dalla presenza della spira nel cavo ma, temendo che la presenza della spira potesse falsare le misure effettive, si è preferito scegliere una soglia intorno ai 135-150 mV, dove il rumore fosse trascurabile anche in assenza della spira. Le due serie di dati sono state poi raccolte rispettivamente in assenza e in presenza della spira.

A seguito le misure in forma di grafico:



Si ha:

Media (spira) = 3,00 Hz

Deviazione Standard del campione (spira) = 0,26 Hz

Media (senza spira) = 3,21 Hz

Deviazione Standard del campione (senza spira) = 0,54 Hz

Media (complessiva) = 3,10 Hz

Deviazione Standard del campione (complessiva) = 0,43 Hz

### **Analisi dei dati:**

Utilizzando i cinque punti dati ottenuti (due per Pietrasanta, uno per Abetone, due per il Monte Gomito) si è eseguito un best-fit esponenziale (tramite calcolatrice), che ha restituito una funzione della forma:

$$N(h) = 0,855\text{Hz} * e^{(0,00062\text{m}^{-1} * h)}$$

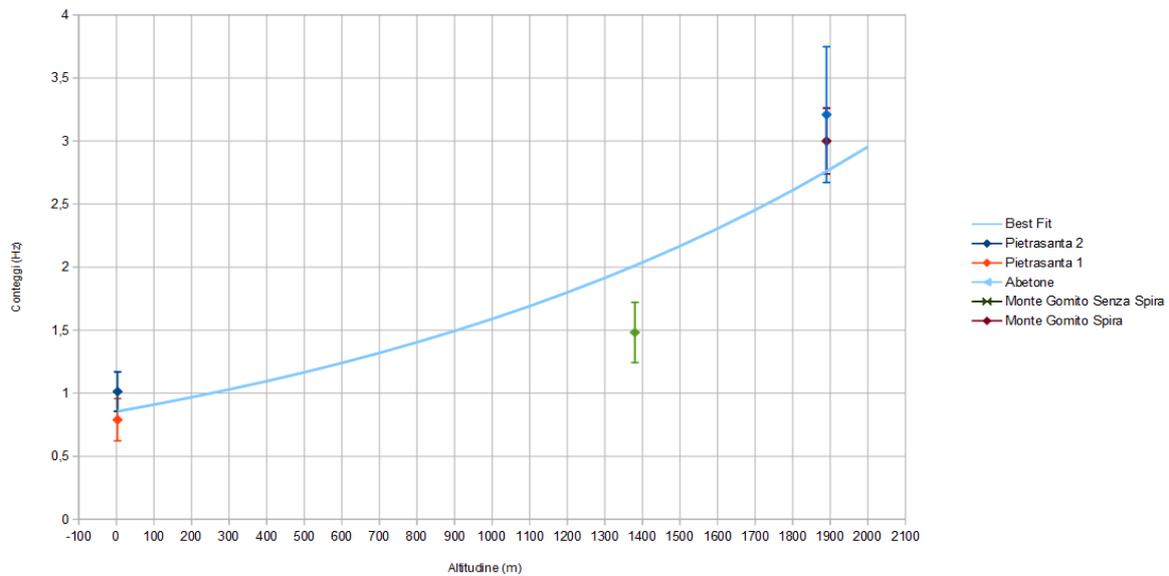
La cui forma teorica derivante dal decadimento dei muoni ( $\tau = 2,2 \mu\text{s}$ ), ipotizzando trascurabili le interazioni tra i muoni e l'atmosfera nell'intervallo di altitudini considerato, è:

$$N(h) = N(0) * e^{(h / (v \tau \gamma(v)))}$$

Da cui si ricava:

$$v \gamma(v) = (\tau * 0,00062\text{m}^{-1})^{-1}$$

$$v \approx 0,9256 c$$



Ciò è in contrasto con la teoria, secondo cui l'energia media dei muoni a livello del mare è di circa 4 GeV, e la velocità media è quindi  $v \approx 0,9997c$ . Considerando però gli errori percentuali sulle cinque misure, e stimando l'errore complessivo percentuale su  $0,00062m^{-1}$  con il metodo dei quadrati, si ha:

$$E_{\text{compl}} = \sqrt{((15,5\%)^2 + (21,1\%)^2 + (16,2\%)^2 + (16,8\%)^2 + (8,7\%)^2)} = 36,1\%$$

E, propagando l'errore nella formula per ricavare  $v$ , si trova:

$$v = (0,900 \pm 0,057) c$$

Poiché tale risultato non è comunque conforme alla teoria si è deciso di escludere, alla luce delle problematiche riscontrate durante la misura, i dati raccolti al Monte Gomito, come anche i dati raccolti a Pietrasanta con soglia tra 135 e 140 mV, che è ragionevole ritenere sottostimino il valore effettivo dei conteggi. Il nuovo fit ha forma:

$$N(h) = 1,0092\text{Hz} * e^{(0,000277481m^{-1} * h)}$$

Si ha:

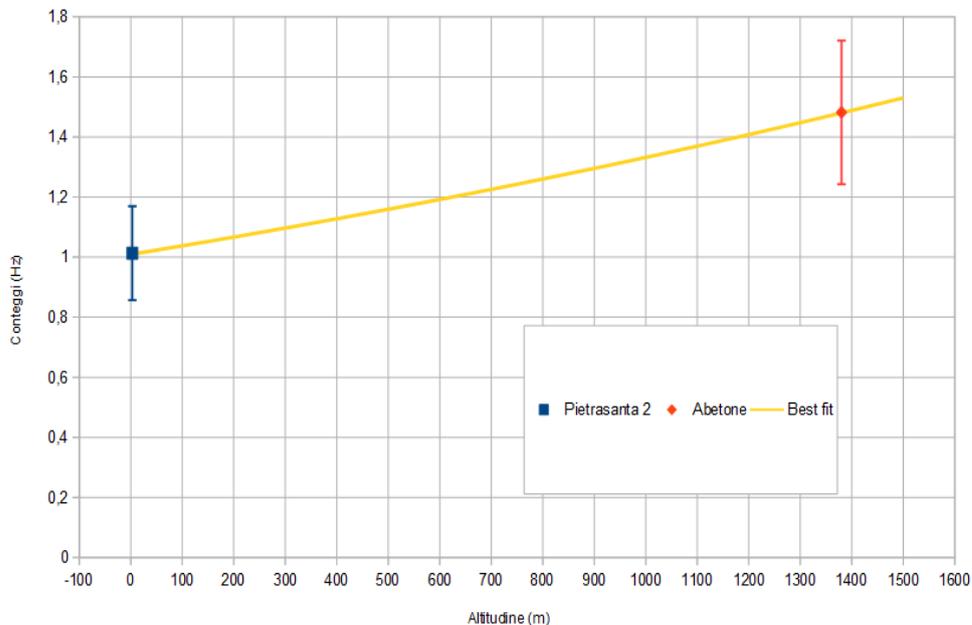
$$v \approx 0,984 c$$

Propagando analogamente gli errori:

$$E_{\text{compl}} = \sqrt{((15,5\%)^2 + (16,2\%)^2)} = 22,4\%$$

$$v = (0,981 \pm 0,008) c$$

Che non coincide comunque con la previsione teorica.



La non corrispondenza tra i dati misurati e la previsione teorica è probabilmente dovuta a una composizione di vari fattori, tra cui si possono ipotizzare, in ordine probabile di importanza crescente:

- Dipendenza non trascurabile dell'efficienza del sensore dalla temperatura; in contrasto con quanto si è rilevato dalle misure preliminari;
- Rilevazione della componente molle dei raggi cosmici, a causa di schermatura non sufficiente;
- Rilevazione di rumore elettromagnetico, in particolare nelle misure sul Monte Gomito;
- Contributo non trascurabile delle interazioni tra i muoni e l'atmosfera nell'intervallo di altitudini considerato, in particolare perdita di energia dei muoni per ionizzazione;

Nonostante tali problematiche, ritengo che l'esperimento possa considerarsi comunque un parziale successo, poiché il confronto tra DCR e conteggi in presenza della tile ha evidenziato la presenza di un flusso di particelle non trascurabile in tutte le località analizzate, e ha anche mostrato un aumento tendenziale di tale flusso con l'altitudine. Inoltre, se pure è vero che la velocità media dei muoni che giungono al suolo è più alta di quella suggerita dalle misure compiute, lo spettro delle possibili velocità dei muoni è piuttosto ampio, e copre certamente anche i risultati trovati (si veda a proposito ad esempio S. Cecchini e M. Spurio "Atmospheric muons: experimental aspects").



## **Applicazioni della misura dei muoni:**

La misurazione del flusso dei muoni cosmici, oltre a fornire interessanti informazioni sulla natura di tali particelle e a permettere uno studio più accurato dei raggi cosmici, trova applicazioni anche al di fuori della fisica in senso stretto; l'applicazione forse più nota e ad oggi sperimentata è la tomografia muonica, consistente nel misurare il flusso di muoni attraverso una struttura di sufficienti dimensioni. Variazioni nella densità della struttura sono correlate a variazioni nei conteggi misurati: zone più dense assorbono più muoni e diminuiscono i conteggi, viceversa per zone meno dense. Misurando il flusso di muoni provenienti da una data angolazione che attraversano la struttura in esame si possono quindi ottenere informazioni su di essa.

Il primo a utilizzare le misure del flusso di muoni a scopi pratici fu Eric George, che nel 1955 le impiegò per calcolare la quantità di materiale presente sopra una galleria, ma la prima vera e propria tomografia muonica fu eseguita nel 1970 dal Premio Nobel Luis Walter Alvarez, che utilizzò questa tecnica per cercare camere non ancora scoperte nella Piramide di Chefren. La ricerca non ebbe successo, ma i metodi utilizzati per calibrare l'apparato mostrarono la fattibilità di una simile misura.

La tomografia muonica è stata poi impiegata nel 2004 nel sito archeologico di Teotihuacan, in Messico, per studiare la struttura interna della Piramide del Sole, in modo analogo a quanto fatto da Alvarez in Egitto, e nel 2007 da Hiroyuki Tanaka et.al. per studiare la struttura interna della sommità del vulcano Asama, in Giappone. La ricerca di Tanaka, mostrando che questa tecnologia può essere impiegata per lo studio dei vulcani, ha gettato le basi per il progetto Mu-Ray, una collaborazione che coinvolge Italia, Francia, Stati Uniti e Giappone, e che nel 2013 ha pubblicato i primi risultati applicando tomografia muonica allo studio del Vesuvio e del Puy de Dôme, in Francia. In futuro questa tecnica potrebbe essere utilizzata per mappare accuratamente la struttura interna dei vulcani con apparati relativamente a basso costo e di facile impiego, aiutando forse anche a prevedere possibili eruzioni.

Esiste contemporaneamente anche un altro filone di ricerca, che mira ad applicare la rilevazione di muoni al settore dei materiali radioattivi; i muoni, attraversando un qualsiasi materiale, possono essere diffusi da urti con i nuclei atomici del materiale, e le caratteristiche di tale diffusione dipendono fortemente dal numero atomico del materiale stesso. Studiando quindi le traiettorie dei singoli muoni in ingresso e in uscita si possono ottenere informazioni sugli elementi presenti nell'oggetto in questione. Le applicazioni a riguardo sono, come per la tomografia muonica, ancora in via di sviluppo e, tra le altre, includono il controllo dei depositi di carburante nucleare esausto, la caratterizzazione dei rifiuti radioattivi prima del trattamento e il controllo delle merci in transito per rilevare l'eventuale presenza di materiale radioattivo di contrabbando.

## Bibliografia:

### Sui raggi cosmici:

- Fondazione Nobel, "Presentation Speech by Prof. H. Pleijel, Chairman of the Nobel Committee for Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences, on December 10, 1936", [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1936/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1936/press.html), consultato il 18/06/2017;
- John North, "Cosmos - an illustrated history of astronomy and cosmology", The University of Chicago Press, 2008, pagina 686
- NASA, "NASA'S Fermi Proves Supernova Remnants Produce Cosmic Rays", [https://www.nasa.gov/home/hqnews/2013/feb/HQ\\_13-052\\_FERMI\\_Supernova.html](https://www.nasa.gov/home/hqnews/2013/feb/HQ_13-052_FERMI_Supernova.html), consultato il 18/06/2017;
- NASA, "What are cosmic rays?", [http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know\\_11/cosmic\\_rays.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_11/cosmic_rays.html), consultata la versione del 28/10/2012 tramite web.archive.org;
- "Cosmic Rays" (Particle Data Group, Revised August 2007 by T.K. Gaisser and T. Stanev (Bartol Research Inst., Univ. of Delaware)), disponibile su <http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/cosmicrayrpp.pdf>, consultato il 18/06/2017;
- Los Alamos National Laboratory, "Cosmic Rays", <http://www.lanl.gov/milagro/cosmicrays.shtml>, consultata la versione del 05/03/2013 tramite web.archive.org
- University of Florida, "Cosmic Ray Muons and the Muon Lifetime", disponibile su [http://www.phys.ufl.edu/courses/phy4803L/group\\_1/muon/muon.pdf](http://www.phys.ufl.edu/courses/phy4803L/group_1/muon/muon.pdf), consultato il 18/06/2017;

### Sull'esperimento di Rossi e Hall:

- Bruno Rossi, David B. Hall, "Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum", University of Chicago, Chicago, Illinois, 01/02/1941, disponibile su <http://spiff.rit.edu/classes/phys314/lectures/muon/rossi.pdf>;

### Sul mio esperimento:

- CAEN, SP5600AN Educational Kit - Premium Version QuickStart Guide, disponibile su <http://www.caen.it/servlet/checkCaenDocumentFile?Id=11917> (download diretto), rev.0;
- "An introduction to the Silicon Photomultiplier", <http://www.sensl.com/downloads/ds/TN%20-%20Intro%20to%20SPM%20Tech.pdf>, consultato il 18/06/2017;
- S. Cecchini e M. Spurio "Atmospheric muons: experimental aspects", 21/11/2012, disponibile su <http://www.geosci-instrum-method-data-syst.net/1/185/2012/gi-1-185-2012.pdf>;

### Sulle applicazioni pratiche delle misure dei muoni:

- Luis W. Alvarez et. al., "Search for Hidden Chambers in the Pyramids", SCIENCE vol.167, 06/02/1970, disponibile online su [http://lappweb.in2p3.fr/~chefdevi/Work\\_LAPP/Arche/alvarez\\_70.pdf](http://lappweb.in2p3.fr/~chefdevi/Work_LAPP/Arche/alvarez_70.pdf);
- BBC, Claire Marshall, "Physicists probe ancient pyramid", <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/3710735.stm>, consultato il 20/06/2017
- BBC, Paul Rincon, "Rays to nab nuclear smugglers", <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4282657.stm>, consultato il 20/06/2017
- G. Jonkmansa, V. N. P. Anghela, C. Jewetta, M. Thompson, "Nuclear Waste Imaging and Spent Fuel Verification by Muon Tomography", 24/09/2012, disponibile online su <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1210/1210.1858.pdf>;

