



Università  
Ca' Foscari  
Venezia

# Tecniche di monitoraggio della radioattività ambientale

Laureando: Mattia Aldighieri  
Tesi per il Corso di Laurea in  
Ingegneria Fisica

Numero di matricola: 895164

Relatore: Prof. Alberto Vomiero

Correlatori: Ing.ra Stefania Canella, Dott. Marco Cinausero, Dott.ssa  
Anna Selva, Dott.ssa Anna Bianchi

Anno accademico: 2024-2025

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>4</b>
1.1 L'esperimento Discover22 ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso . . .	6
1.2 Sorgenti ambientali di radiazione . . . . .	7
<b>2 Strumenti utilizzati</b>	<b>8</b>
2.1 Scintillatori organici per la misura del flusso di muoni . . . . .	8
2.2 Rivelatori attivi a "cella di Lucas" per la concentrazione di Radon . .	12
2.3 EuTEPC per misure microdosimetriche del fondo di radiazione . . . .	14
2.3.1 Approccio microdosimetrico . . . . .	15
2.3.2 Principali quantità microdosimetriche . . . . .	15
2.3.3 Contatore Proporzionale Tessuto Equivalente (TEPC) . . . . .	17
2.3.4 Descrizione apparato strumentale . . . . .	18
2.3.5 Setup misurazioni del fondo e della sorgente gamma di riferi- mento . . . . .	22
<b>3 Risultati sperimentali</b>	<b>27</b>
3.1 Python per il calcolo scientifico . . . . .	27
3.2 Confronto del flusso di muoni all'esterno e all'interno della galleria del LNGS . . . . .	28
3.3 Rilevazione dell'effetto Forbush durante la tempesta geomagnetica di maggio 2024 . . . . .	36

3.4	Confronto delle concentrazioni di Radon all'esterno e all'interno della galleria . . . . .	43
	<b>Conclusioni</b>	<b>46</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>47</b>

# Abstract

# Capitolo 1

## Introduzione

Per radioattività si intende la trasformazione spontanea di nuclei con emissione di particelle o onde elettromagnetiche (le cosiddette radiazioni), a cui è associata la generazione e il trasporto di energia. Sebbene sia generalmente considerata una realtà distante e particolare solo di alcuni contesti, l'esposizione è in realtà continua: si parla di radioattività ambientale, che sia essa naturale, derivante cioè naturalmente dal terreno e dallo spazio, o artificiale, derivante invece da attività industriali, di ricerca, mediche o militari.

Mentre sono ben conosciuti gli effetti biologici sull'uomo di alti livelli di radioattività, a lungo ci si è chiesti se una bassa quantità di radiazioni, come il fondo naturale di radiazione, possa invece avere un effetto positivo. Si ritiene, in particolare, che un fondo di radioattività sempre presente abbia un effetto di stimolazione del sistema immunitario e che possa in generale aumentare la resilienza delle cellule.

È in questo contesto che l'esperimento DISCOVER22 si inserisce: esso vuole studiare come degli organismi viventi reagiscono in presenza di un fondo di radiazione naturale o di un fondo estremamente ridotto, confrontando eventuali differenze.

Per assicurare una condizione di radioattività più bassa di quella del fondo ambientale è stato scelto come sito il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso (INFN-LNGS): i suoi 1400 metri di roccia garantiscono un abbattimento della componente cosmogenica del fondo (ossia quella proveniente dallo spazio), mentre la componente terrestre (ossia quella dovuta agli elementi radioattivi presenti nel mantello terrestre) è quasi azzerata data la scarsa presenza dei principali radionuclidi nella roccia del Gran Sasso.

Questo tuttavia non è una garanzia di un completo annullamento della radioat-

tività ambientale. Ad esempio, circa il 50%<sup>2</sup> della dose assorbita annualmente dall'uomo è infatti dovuta al Radon, **gas che si accumula naturalmente negli ambienti chiusi**. ~~In generale, c'è tutta una serie di sorgenti di radioattività di cui non sempre è facile tenere traccia.~~ Rimane pertanto di estrema rilevanza mantenere un attento monitoraggio della radioattività ambientale presente al **Gran Sasso**, ~~in modo da poter correttamente attribuire eventuali differenze biologiche tra i due campioni di organismi viventi alla presenza o meno del campo di radiazione ambientale.~~

In questa tesi si studieranno alcune tecniche per il monitoraggio della radioattività ambientale ~~al Gran Sasso~~<sup>1</sup>. In particolare, **3** saranno le modalità attraverso cui avrà luogo **la monitoraggio**. **In primo luogo verrà controllata e confermata la riduzione del flusso di cosmici in galleria, attraverso degli strumenti chiamati scintillatori. Risulterà qui necessario approfondire il legame tra il flusso di cosmici e le condizioni ambientali, per meglio comprendere eventuali variazioni (possibilmente rilevanti).**

In secondo luogo verranno analizzate le concentrazioni nel tempo del Radon, **cercando di individuare le cause di eventuali variazioni.**

Infine, per rilevare la qualità della radiazione a cui sono sottoposte **le cellule** e ~~avere quindi un controllo più puntuale della radiazione di fondo~~ si utilizzerà un microdosimetro: **mentre un semplice flusso di cosmici o delle concentrazioni di radon possono fornire un resoconto sulla quantità di radiazione assorbita dalla materia,** nel caso di cellule e in generale di organismi di dimensione micrometrica è fondamentale indagare, **più che la quantità, il** come avviene la deposizione di energia: avere infatti un rilascio di energia molto localizzato può essere più impattante rispetto a distribuire la stessa energia in un'area maggiore, ~~provocando possibilmente nel primo caso eventuali effetti biologici dannosi (quali l'alterazione del DNA o la morte della cellula).~~

Il microdosimetro qui utilizzato, EuTEPC, è lo strumento progettato ai Laboratori Nazionali di Legnaro (INFN-LNL) e che sarà usato a INFN-LNGS. La sua caratterizzazione completa è già stata effettuata,<sup>1</sup> pertanto qui sarà messo in atto un collaudo generale in vista **della sua spedizione** a INFN-LNGS: sarà effettuata una misura della sorgente gamma di riferimento (il Cesio-137) e una misura del fondo di radiazione ambientale di due settimane.

---

<sup>1</sup>verrà cambiato in base al titolo scelto

## 1.1 L'esperimento Discover22 ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso

L'esperimento DISCOVER22 (DNA Damage and Immune System Cooperation in Very Low Radiation Environment 2022) nasce nell'ambito della radiobiologia sulla necessità di approfondire se l'esposizione a un basso campo di radiazioni ionizzanti possa fornire uno stimolo allo sviluppo da parte del sistema immunitario di organismi viventi di meccanismi difensivi, riparatori ed adattivi ad esempio nei confronti di danni al DNA.

Risulta quindi necessario identificare un sito in cui la radioattività ambientale sia in qualche modo attenuata, per provare la tesi: i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (INFN-LNGS) sono adatti allo scopo.

INFN-LNGS presenta infatti 1400 metri di roccia, i quali riescono ad abbattere la quasi totalità dei raggi cosmici incidenti provenienti dallo spazio, offrendo un fattore di riduzione di  $10^{52}$  rispetto all'esterno. La composizione della roccia è inoltre estremamente povera di Torio e Uranio, ovvero i principali radionuclidi di origine terrestre che contribuiscono a comporre il fondo di radiazione naturale.

I laboratori sono poi provvisti di un sistema di ventilazione forzata, che oltre a fornire aria dall'esterno permette di evitare l'accumulo di Radon all'interno della galleria dove sono situati i laboratori, mantenendo le concentrazioni paragonabili a quelle esterne.

Nel corso dell'esperimento (della durata di 3 anni), gli effetti del fondo di radiazione saranno studiati in cellule in vitro e in vivo (con degli individui di *Drosophila melanogaster*), posizionando i campioni all'esterno e all'interno della galleria, alla ricerca di eventuali differenze biologiche tra gli organismi.

Evidentemente, per poter attribuire con sufficiente confidenza l'origine di tali disparità proprio alla presenza del campo di radiazione è strettamente necessario monitorare i livelli di radiazioni nei luoghi coinvolti dall'esperimento in maniera continua. Il campo di radiazione infatti non è costante nel tempo: molti sono i fattori che lo possono influenzare, come attività solari anomale o semplici condizioni meteorologiche. Questo aspetto sarà approfondito successivamente.

Come già spiegato, inoltre, avere solo una misura della quantità della radiazione assorbita dai tessuti è insufficiente per una descrizione completa di ciò che avviene a livello cellulare e sub-cellulare, soprattutto nel caso di ambienti a bassissimo livello

---

<sup>2</sup>Gabriele ha questo dato, io mi ricordavo  $10^6$

~~di radiazioni~~: risulta necessario quindi un monitoraggio continuo della qualità della radiazione. Per questo motivo il gruppo di microdosimetria dei laboratori di Legnaro (INFN-LNL) è impegnato nel design e nella caratterizzazione di un microdosimetro: per la prima volta l'approccio microdosimetro verrà quindi usato per lo studio della radiazione ambientale, compito che finora nell'ambito della radiobiologia era affidato solo a simulazioni.

## **1.2 Sorgenti ambientali di radiazione**

# Capitolo 2

## Strumenti utilizzati

Si raccolgono qui le descrizioni delle varie strumentazioni utilizzate.

Per quanto concerne il flusso di muoni verrà descritto lo strumento utilizzato, uno scintillatore organico, evidenziando come alcune variabili ambientali (~~eome~~ temperatura e pressione) possano **interferire** sulle misure.

Per le misure sulla concentrazione del radon, oltre ad una panoramica sui vari metodi di misura si approfondirà il rivelatore qui utilizzato, ovvero un rivelatore attivo a **cella scintillante**.

Le misure del fondo ambientale saranno effettuate attraverso il già citato microdosimetro EuTEPC. Si darà innanzitutto una adeguata descrizione dei principi della microdosimetria e dei microdosimetri a gas di tipo TEPC (tissue equivalent proportional counter), e infine verranno illustrate le componenti di EuTEPC.

### 2.1 Scintillatori organici per la misura del flusso di muoni

Per misurare il flusso ambientale dei muoni si usa un sistema di misura basato su una coppia di scintillatori organici EJ-200,<sup>3</sup> ossia delle piastre di poliviniltoluene 30x30 cm e spessore 1 cm. In questi materiali l'interazione con la radiazione produce scintillazioni, **ossia viene assorbita la sua energia e viene riemessa sotto forma di luce, quindi fotoni**. Questi vengono raccolti da una fibra ottica Saint **Gobin** BCF-92 (con un core di polistirene e un cladding di PMMA, polimetilmetacrilato) sepolta all'interno della piastra in una disposizione pseudocircolare (si veda figura 2.1) e

guidati verso i due terminali posti su una faccia laterale dello scintillatore. Per rilevare elettronicamente tali fotoni essi vengono raccolti attraverso dei dispositivi detti Silicon Photomultiplier (o SiPM, in italiano fotomoltiplicatori al silicio), posti a contatto con i terminali della guida d'onda. I SiPM sono dispositivi costituiti da un array di fotodiodi a valanga, i quali reagiscono all'assorbimento di un fotone producendo una valanga di elettroni che produce una corrente di intensità tale da poter essere rivelata. Trasducono quindi la luce in una corrente proporzionale agli impulsi luminosi rilevati, corrente che è poi trattabile elettronicamente.

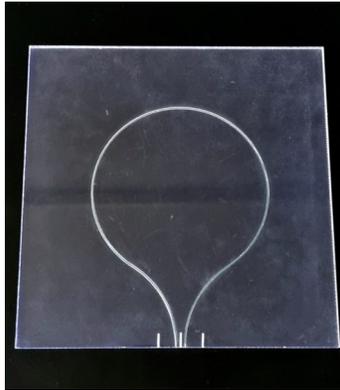


Figura 2.1: Piastra plastica che costituisce lo scintillatore, con visibile la fibra ottica interna che raccoglie i segnali luminosi



Figura 2.2: Dettaglio dei terminali della fibra ottica dello scintillatore

La misura del flusso di muoni è stata effettuata appoggiando due piastre scintillanti una sopra l'altra **in direzione orizzontale**.

Il passaggio di un muone attraverso le piastre viene identificato quando si ha produzione di fotoni in entrambi gli scintillatori in una finestra di tempo di 50 ns; i muoni sono infatti prodotti in alta atmosfera dai cosmici primari e arrivano a livello

~~del mare a una velocità di poco inferiore alla velocità della luce, riuscendo così ad attraversare entrambe le piastre. La richiesta di coincidenza di un segnale elettrico nei 4 SiPM (2 per ogni piastra) quindi elimina gran parte degli eventi spuri.~~

La scheda elettronica che si occupa di processare i segnali dei SiPM è del Fermilab e permette anche la misura di alcune variabili ambientali (temperatura e pressione). Queste ultime rivestono particolare importanza, in quanto il funzionamento dei SiPM è molto influenzato dalla temperatura (come si discuterà nel prossimo capitolo) e il flusso di muoni dipende tra i vari fattori in particolar modo dalla pressione.



Figura 2.3: Scheda Fermilab per la rilevazione delle coincidenze e Raspberry Pi 3 per l'acquisizione dati e loro salvataggio

Inoltre, per funzionare correttamente le piastre scintillanti vengono coperte con un rivestimento "a prova di luce", poiché i fotoni della luce naturale (~~non derivanti dalle scintillazioni prodotte dai muoni~~) costituiscono una fonte di rumore di fondo, ~~acceccando così lo strumento.~~

Un'altra modalità di funzionamento è aumentare la distanza tra le due piastre. Questo in primis diminuisce il conteggio di muoni. Ciò è dovuto al fatto che le traiettorie dei muoni per intercettare entrambe le piastre dovranno avere una certa angolazione (più tecnicamente devono appartenere all'angolo solido descritto dalle due piastre, si veda foto esplicativa 2.4): più le piastre sono distanti e più l'angolo solido che descrivono è piccolo, pertanto i muoni dalle traiettorie con queste angolazioni saranno in numero via via inferiore. Per questo il conteggio che viene misurato dagli strumenti non è una misura assoluta, ma sarà proporzionale all'angolo solido descritto dagli strumenti, e dipenderà anche dalla loro efficienza.

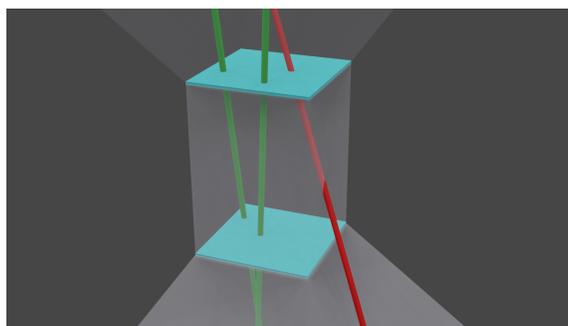


Figura 2.4: Rappresentazione dell'angolo solido descritto da due piastre distanziate

In secondo luogo aumentare la distanza tra le piastre diminuisce la probabilità che particelle spurie vengano conteggiate come muoni: più sono distanziate e più l'angolo solido che descrivono è piccolo, e dunque eventuali particelle dovrebbero avere una traiettoria quanto più possibile verticale (si faccia riferimento alla figura 2.4), il che è intrinseco per i muoni ma non necessariamente per altre particelle.

La configurazione qui utilizzata (a cui ci si riferirà nel seguito con "piastre accoppiate") è composta semplicemente dalle due piastre direttamente appoggiate l'una sull'altra.



Figura 2.5: Piastre accoppiate con un ulteriore involucro di stoffa per la tenuta della luce, con visibile la componente elettronica (Fermilab e Raspberry)

Oltre alla scheda elettronica<sup>1</sup> adibita al conteggio delle coincidenze lo strumento

---

<sup>1</sup>Marco chiedeva una referenza

ha in dotazione un Raspberry Pi 3 che si occupa di registrare e memorizzare conteggi, temperatura e pressione ogni minuto. Il collegamento cablato alla rete dell'INFN permette di poter accedere ai dati da remoto. ~~Si precisa che la disponibilità dei dati delle piastre non è continua: esse vengono infatti spostate spesso (in quanto agevoli da dislocare) per diverse sperimentazioni.~~

~~Sono quindi adatte per le misurazioni dei muoni al Laboratorio del Gran Sasso per avere una conferma dell'abbattimento dei raggi cosmici a causa della presenza della montagna, in vista dell'esperimento Discover22.~~

Le piastre hanno misurato in due sessioni: dal 14 dicembre 2023 fino al 2 aprile 2024 sono state tenute in galleria (sotto il Gran Sasso), mentre dal 4 aprile fino al 6 giugno 2024 sono state tenute fuori galleria. Questi saranno pertanto i dati che verranno analizzati nel prossimo capitolo.

Si precisa che, nonostante lo strumento **non rilevi il flusso assoluto di muoni**, ~~questo non è importante ai fini di questa tesi: si vuole infatti verificare la diminuzione relativa del flusso di muoni dovuta alla presenza della roccia del Gran Sasso.~~

## 2.2 Rivelatori attivi a "cella di Lucas" per la concentrazione di **Radon**

La misura della concentrazione di Radon può essere effettuata attraverso metodi e strumenti detti "passivi" o "attivi". ~~Quelli passivi raccolgono le tracce di Radon spontaneamente, senza un attivo controllo elettronico periodico.~~ Alcuni **esempi** sono:

### 1. Dispositivi a carboni attivi

**I carboni attivi intrappolano il radon, quindi vengono tenuti in esposizione per un certo periodo di tempo all'aria, e solo successivamente vengono mandati in laboratori appositi per il conteggio**

### 2. Film sensibili alla radiazione alfa

Dopo l'esposizione, trattando chimicamente il film è possibile rivelare le tracce delle particelle alfa e contarle al microscopio

### 3. Elettreti

Sono dischi di plastica portati ad un certo potenziale che quando entrano in contatto con l'aria (attraverso opportuni filtri) e quindi con il radon, a seguito dell'emissione di particelle alfa l'elettrete viene scaricato progressivamen-

te; il controllo del potenziale dopo l'esposizione rispetto al potenziale iniziale permette di risalire alla concentrazione di radon

I dispositivi passivi ~~quindi~~ non permettono di avere una misura della concentrazione di radon in **real-time**, poiché il calcolo della concentrazione è fatta ~~generalmente~~ a posteriori, dopo misure solitamente medio-lunghe (ad esempio un mese di **esposizione**).

Sono i dispositivi attivi che permettono invece misure **istantanee tramite opportuni mezzi elettronici**.

~~La "cella di Lucas" è lo strumento usato in questa campagna di misurazioni~~ **per la rilevazione attiva della concentrazione di Radon** ~~(attraverso l'ausilio del monitor<sup>2</sup> modello MR1 TESYS di proprietà dell'ARPAV)~~. Si tratta di un cilindro cavo (si veda immagine 2.6) le cui pareti **ricoperta** di solfuro di zinco in cui il Radon entra per diffusione attraverso una membrana permeabile o per flusso diretto di aria. Il solfuro di zinco è un materiale sensibile all'interazione delle particelle alfa generate dalla catena di decadimento del Radon: a seguito dell'interazione produce scintillazione, e un tubo fotomoltiplicatore (**TPM**) accoppiato riesce a rilevare tali fotoni e a trasformarli in modo simile ai SiPM in segnali elettrici, **in modo da poterne avere un conteggio**. **In particolare l'arrivo del fotone produce (allo scontro con una superficie posizionata all'ingresso del TPM) per effetto fotoelettrico un fotoelettrone, il quale viaggia verso una serie di elettrodi che hanno potenziali via via superiori. Il potenziale va ad accelerare il fotoelettrone, che scontrandosi con il primo elettrodo produce altri elettroni (per cosiddetta emissione secondaria), a loro volta accelerati dagli elettrodi successivi su cui si scontreranno gli elettroni prodotti. Si ha così una cascata di elettroni, che raggiunto il termine del tubo fotomoltiplicatore vanno a colpire l'anodo, evento che costituisce la rilevazione effettiva del fotone. Si può risalire in questo modo alla concentrazione di Radon espressa in  $Bq/m^3$  o, equivalentemente in decadimenti al secondo per  $m^3$ , attraverso opportuna calibrazione dello strumento operata dall'ARPAV.**

---

<sup>2</sup>in che altro modo si può chiamare tutto ciò che non è cella di Lucas?



Figura 2.6: Cella di Lucas



Figura 2.7: Rivelatore radon dell'ARPAV, dove si vede la cella di Lucas montata con la membrana rivolta verso l'esterno

Anche **qui è presente** un Raspberry Pi 3 che si occupa di registrare e memorizzare la concentrazione ogni 10 minuti, con possibilità di poter accedere ai dati da remoto. I periodi di misura del radon sono gli stessi di quelli delle piastre: da dicembre 2023 ad aprile 2024 i dati si riferiscono alle concentrazioni in galleria del Gran Sasso, mentre da aprile a giugno 2024 le misure sono prese fuori galleria.

## 2.3 EuTEPC per misure microdosimetriche del fondo di radiazione

In questa sezione verranno spiegati i principi della microdosimetria, sia teorici che pratici, parlando dello strumento principe utilizzato in questo campo: il TEPC.

Verrà poi adeguatamente descritto il particolare TEPC usato qui, EuTEPC, per poi concludere descrivendo le procedure per poterlo mettere in misura.

### 2.3.1 Approccio microdosimetrico

Come anticipato, risulta necessario avere un monitoraggio di ciò a cui le cellule sono esposte. Tradizionalmente, una misura di quante radiazioni sono state assorbite è la dose, definita proprio come l'energia media assorbita per unità di massa. Questa media tuttavia non tiene conto delle eventuali fluttuazioni spaziali randomiche con cui le radiazioni possono rilasciare energia lungo il loro percorso, portando potenzialmente a un effetto biologico molto diverso: ad esempio concentrare una certa quantità di energia in una determinata (piccola) regione può risultare localmente più critico rispetto a distribuire più uniformemente la stessa quantità di energia ma in un'area maggiore, risultando in un effetto trascurabile. L'attenzione va quindi volta più alla qualità della radiazione, più che alla quantità.

Questo è evidentemente rilevante in uno studio degli effetti delle radiazioni: entra qui in gioco la microdosimetria. Essa studia proprio gli aspetti stocastici della deposizione di energia in volumi micrometrici di materia irradiata.

L'aspetto stocastico diventa di fondamentale rilevanza proprio quando l'oggetto dello studio sono organismi micrometrici, o quando gli eventi radioattivi sono molto ridotti in numero: la dose assorbita fornirà un'informazione su quanto è bassa la quantità di energia apportata alla materia, ma appunto perchè è bassa risulta interessante capire dove questa andrà a depositarsi, perchè magari è così efficace tanto da essere determinante. Questo non è vero ad alte dosi, dove comunque sia l'apporto di energia è alto e dunque il danno è generalizzato nell'interezza della materia colpita.<sup>3</sup>

I risultati finali dell'elaborazione degli spettri microdosimetrici saranno le cosiddette distribuzioni in dose, che osserveranno lo scopo qui descritto: esse forniscono infatti il contributo alla dose (in frazione) di ogni evento di specifica energia (normalizzata sulla lunghezza).

### 2.3.2 Principali quantità microdosimetriche

La prima quantità generalmente utilizzata per esprimere un assorbimento di radiazione è la già citata dose assorbita (la cui unità di misura è il Gray, Gy), definita come l'energia media impartita dalla radiazione per unità di massa:

---

<sup>3</sup>quest'ultima frase è corretta?

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

Come già detto, la dose non è tuttavia sufficiente.

Un tentativo di tenere in conto della distribuzione spaziale del deposito d'energia è il LET (Linear Transfer Energy), definita come l'energia media depositata per unità di lunghezza.

$$LET = \frac{d\bar{E}}{dx}$$

Tuttavia, nemmeno il LET è completamente descrittivo delle dinamiche che accadono durante la deposizione d'energia dovuta a radiazioni: come già spiegato, è necessario tenere in conto dell'aspetto stocastico dell'irraggiamento, dominante nel caso di basse dosi e di target micrometrici.

Risulta quindi necessario passare a quantità descrittive della reale distribuzione spaziale dell'energia, evento per evento<sup>4</sup>.

Si introduce quindi l'energia lineale  $y$ :

$$y = \frac{\varepsilon}{\bar{l}}$$

dove  $\varepsilon$  è l'energia depositata in un certo volume da un singolo evento e  $\bar{l}$  è la lunghezza della corda media di quel particolare volume, definita come la lunghezza media di una corda casualmente orientata in tale volume. Per volumi convessi vale:

$$\bar{l} = \frac{4V}{S}$$

con  $V$  il suddetto volume e  $S$  la sua superficie.

Essendo  $y$  una quantità stocastica, è interessante studiarne ed introdurre la relativa distribuzione in frequenza  $F(y)$ , ossia la probabilità che l'energia lineale depositata in un singolo evento sia minore o uguale di  $y$ . La sua derivata rispetto a  $y$  è la densità di probabilità  $f(y)$ . Si definisce anche la distribuzione in dose di  $y$ ,  $D(y)$ , ossia la frazione di dose assorbita causata da deposizioni con energia lineale minore

---

<sup>4</sup>cosa significa precisamente evento per evento? Frase di Gabriele: In order to better understand the correlation between the radiation fields and the induced damages it is fundamental to measure the whole distribution of imparted energy event by event rather than only the average quantity that might not be fully significant.

o uguale a  $0^5$ . La densità di probabilità in dose è la sua derivata rispetto a  $y$ ,  $d(y)$ , ed esprime la frazione di dose assorbita per evento con energia lineale compresa tra  $y$  e  $y + dy$ , ergo fornisce informazioni su come i vari eventi caratterizzati da diverse energie lineali contribuiscono in frazione alla dose.

Le due quantità sono legate dalla seguente relazione:

$$d(y) = \frac{yf(y)}{\bar{y}_F}$$

dove  $\bar{y}_F$  è il valor medio in frequenza:

$$\bar{y}_F = \int_0^{+\infty} yf(y)dy$$

Le quantità descritte permetteranno la costruzione degli spettri microdosimetrici. I valori dell'energia lineale possono spaziare su più ordini di grandezza, motivo per cui in ascissa ci sarà  $y$  in una scala logaritmica, con unità di misura  $keV/\mu m$ , mentre in ordinata saranno si avranno le distribuzioni in frequenza e in dose,  $yf(y)$  e  $yd(y)$ . La moltiplicazione per  $y$  a entrambe le distribuzioni permette di ottenere degli spettri in scala semilogaritmica la cui area non sia distorta nonostante la scala logaritmica: in questo modo, spostandosi lungo l'asse x, a eguali aree corrispondono eguali contributi alla frequenza o alla dose.

### 2.3.3 Contatore Proporzionale Tessuto Equivalente (TEPC)

Per rilevare ciò a cui una cellula è esposta, sarebbe necessario misurare il numero di ionizzazioni avvenute in delle strutture di dimensioni micrometriche, ma questo è evidentemente difficile. Quello che si fa è simulare una versione più grande del tessuto oggetto dello studio, in modo da poter effettuare misure su dimensioni gestibili. Questo viene effettuato attraverso dei microdosimetri a gas detti TEPC, o Tissue Equivalent Proportional Counter (Contatore Proporzionale Tessuto Equivalente), utilizzando il principio di simulazione: per simulare un volume micrometrico di tessuto con una certa densità, si utilizza un volume (detto tessuto equivalente)  $s$  volte più grande, con una densità  $s$  volte minore, in modo da avere lo stesso numero di molecole (per unità di lunghezza) che si sarebbero avute nel volume da simulare. In questo modo si ha un volume che è equivalente al tessuto e su cui si possono effettuare tutte le misure del caso.

---

<sup>5</sup>perchè 0? forse  $y$ ?

Quello che si fa è quindi riempire il volume del microdosimetro (che rappresenterà appunto l'equivalente del tessuto) con un gas a bassa densità, ed evidentemente è necessario che il gas e i materiali costituenti del rivelatore siano quanto più simili possibile, in composizione, a quelli dei tessuti che si stanno simulando. In particolare, i tessuti biologici hanno una composizione chimica formata prevalentemente da carbonio, idrogeno, ossigeno ed azoto. Il volume sensibile del microdosimetro è delimitato da una particolare plastica conduttiva (plastica A-150), con componenti costituenti principali quelli appena citati. Il gas utilizzato è invece il propano, gas anch'esso a composizione simile. <sup>6</sup> Si precisa che l'assunzione che si fa è che il trasferimento d'energia da parte di radiazioni ionizzanti dipenda più dalla composizione atomica media più che dai reali legami chimici nelle varie sostanze.

La rilevazione avviene attraverso la misurazione di una carica direttamente proporzionale al numero di ioni generati dalla ionizzazione che si vuole rilevare. Quando la radiazione provoca una ionizzazione nel gas si crea una coppia di cariche, uno ione positivo e un elettrone libero. Poiché tra la plastica conduttiva esterna e un filo conduttivo centrale viene applicata una differenza di potenziale, le due cariche accelerano nella direzione del campo elettrico, puntando nel verso coerente con il segno della loro carica: l'elettrone accelererà verso l'anodo centrale, mentre lo ione positivo verso il catodo esterno. Durante il loro percorso, gli elettroni acquisiscono sufficiente energia per ionizzare a loro volta altri atomi del gas, che a loro volta potranno ionizzare ancora, portando così ad una cascata di elettroni. La carica di questa valanga di elettroni viene letta all'anodo, e sarà proporzionale al numero di elettroni prodotto dal primo evento di ionizzazione, e quindi all'energia apportata dalla radiazione.

### 2.3.4 Descrizione apparato strumentale

Lo strumento qui utilizzato è EuTEPC (European Tissue Equivalent Proportional Counter), un microdosimetro a gas sferico prodotto in una collaborazione tra INFN-LNL e la European Space Agency (ESA).

---

<sup>6</sup>e per l'acciaio esterno?

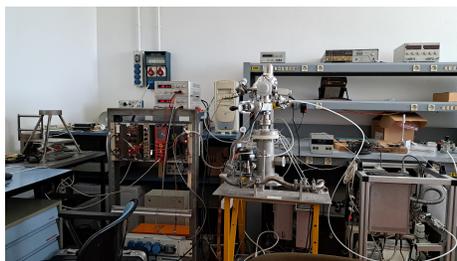


Figura 2.8: L'apparato completo di EuTEPC: lo strumento (al centro), la catena elettronica (a sinistra) e le pompe per il vuoto (a destra)

Il volume sensibile è delimitato da una shell esterna sferica di plastica conduttiva (la già citata A-150) di 5 cm di diametro e spessore 3 mm, che costituisce il catodo. Per ottenere un campo elettrico interno a geometria radiale rispetto all'anodo centrale (un filo di tungsteno placcato d'oro di diametro  $100 \mu\text{m}$ ) il catodo è in realtà diviso in 9 segmenti sferici (separati tra loro da degli anelli isolanti di spessore 0.5 mm), a cui è applicata una tensione diversa (attraverso un partitore di tensione) in modo da ottenere il campo elettrico desiderato. La minima tensione raggiunta dal segmento centrale è  $-800 \text{ V}$  (non si va oltre per evitare possibili scariche), mentre gli altri segmenti hanno tensione in modulo via via minore. L'anodo è invece posto a massa attraverso il preamplificatore: poiché la lettura dell'output sarà presa da qui, si vuole evitare eventuale rumore elettromagnetico che si avrebbe andando ad applicarci una tensione.

Il tutto è mantenuto all'interno di un contenitore d'acciaio inossidabile (di 0.375 mm di spessore) che permetta la tenuta a vuoto del detector interno. Le connessioni con l'esterno (ossia una valvola e i terminali elettrici) sono alla base del contenitore. Qui sono presenti due schede elettroniche: una per il partitore di tensione e una per il preamplificatore, che legge i segnali all'anodo producendo una tensione positiva.

Tutto l'apparato ha una protezione d'alluminio (di 0.35 mm di spessore) per proteggerlo dall'eventuale rumore elettromagnetico.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup>non ricordo quest'ulteriore copertura. si tratta forse della carta alluminio?

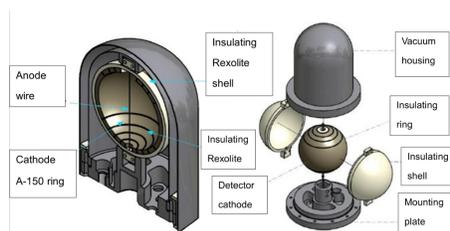


Figura 2.9: Raffigurazione dei costituenti interni di EuTEPC.

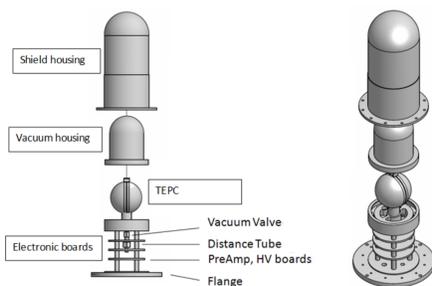


Figura 2.10: Raffigurazione dei costituenti interni di EuTEPC.

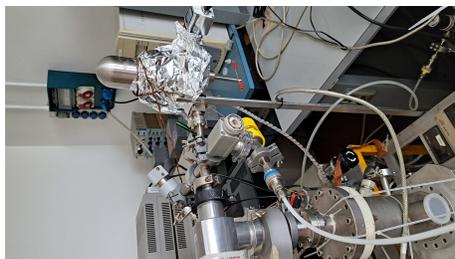


Figura 2.11: EuTEPC

Per l'accensione dello strumento e per la conseguente acquisizione dei dati ci si avvale di una catena elettronica così composta. Innanzitutto il potenziale viene generato da un modulo di alta tensione (Caen 4 channels HV Power Supply Model N1471ET). Gli impulsi poi generati dallo strumento in corrispondenza di ionizzazioni passano, dopo il preamplificatore, a due catene in parallelo. In primo luogo passano per un amplificatore lineare (un Model 673 e un Model 672 Ortec Spectroscopy Amplifier) con due diversi guadagni e successivamente vengono convertiti da un convertitore analogico digitale (ORTEC Model ASPEC-927 Dual Input Multi Channel

Analyser) a 16K canali per approssimazioni successive<sup>8</sup>. Infine il segnale digitale, restituito come conteggi registrati per ogni canale che l'ADC mette a disposizione, è portato tramite un cavo USB ad un PC che lo visualizzerà tramite un software, MAESTRO.

I guadagni degli amplificatori sono diversi poiché si vuole avere una panoramica completa di tutto lo spettro di radiazione: la parte di spettro a basso LET avrà un guadagno 20 volte maggiore di quello ad alto LET, in modo da poter vedere anche le basse energie con una buona risoluzione. Evidentemente, mentre per il canale ad alto guadagno le misure ad alte energie andranno perse perché lo strumento sarà arrivato a fondoscala<sup>9</sup>, il canale a basso guadagno mostrerà anche le basse energie, ma appunto con risoluzione minore. Al momento dell'elaborazione dei dati si opererà quindi una giuntura tra i due spettri in modo da scartare questa parte a bassa risoluzione e tenendo quanto più possibile del canale a guadagno superiore, fino a poco prima che arrivi a fondoscala.



Figura 2.12: La catena elettronica. Il modulo di alta tensione (a destra), gli amplificatori (al centro) e l'ADC (a sinistra)

L'ultimo componente del sistema è il circuito per il vuoto e per il riempimento con il gas. All'interno del microdosimetro infatti si vuole avere solamente il gas tessuto equivalente e idealmente nessun residuo d'aria: per questo motivo è necessario prima svuotarlo dall'aria, mettendolo in vuoto, per poi riempirlo con propano puro. Alla citata valvola sottostante è quindi connesso il circuito per il vuoto e per il riempimento con il gas.

Per la messa in vuoto ci si avvale di due pompe a vuoto: la prima è una normale pompa rotativa usata per arrivare ad una pressione di circa  $10^{-3}$  mbar, mentre

---

<sup>8</sup>la traduzione è giusta?

<sup>9</sup>ricordo bene?

per raggiungere la pressione desiderata (circa  $10^{-4}$  mbar<sup>10</sup>) si utilizza una pompa turbomolecolare.

Un sistema di valvole permette di isolare le varie parti del circuito, potendolo così connettere, una volta messo in vuoto, alla bombola di propano. Questa è equipaggiata con una valvola micrometrica, in modo da aiutare il rilascio graduale di propano nel circuito, fino a raggiungere la pressione desiderata.

Infine, per il monitoraggio della pressione si utilizzano vari strumenti, dato il range in cui la pressione può spaziare. Per la messa in vuoto il controllo della pressione è effettuato tramite due strumenti: da pressione ambiente a  $10^{-3}$  mbar si utilizza un Pirani counter, mentre nel range  $10^{-3}$  mbar -  $10^{-9}$  mbar si utilizza un Penning counter. La pressione del gas è invece controllata da un manometro MKS Series 920B Piezo Vacuum Pressure Transducer.



Figura 2.13: L'apparato per il vuoto

### 2.3.5 Setup misurazioni del fondo e della sorgente gamma di riferimento

Si descrivono ora le procedure per mettere in funzione lo strumento.

Innanzitutto è necessario rimpetire lo strumento del gas tessuto equivalente, in questo caso propano puro.

Prima di inserire il propano si deve però svuotare adeguatamente il circuito dall'aria, inducendo quindi il vuoto. Vengono quindi aperte le valvole che connettono lo strumento alle pompe per il vuoto e viene avviato il processo, come descritto alla sezione precedente: la pompa rotativa si avvia per prima fino ad arrivare ad una pressione di circa  $10^{-3}$  mbar, per poi passare alla pompa turbomolecolare per otte-

---

<sup>10</sup>Gabriele ha scritto  $10^{-6}$  mbar -  $8 \cdot 10^{-7}$  mbar, io mi ero segnato che noi eravamo arrivati a  $10^{-4}$  mbar. quale valore tengo?

nera un vuoto più spinto. Si tiene in vuoto per un paio di giorni<sup>11</sup> in modo sia da avere la pressione desiderata (circa  $10^{-4}$  mbar), sia da tentare di aspirare quanto più possibile eventuali residui d'aria: la plastica usata come catodo è infatti porosa e potrebbe quindi trattenere impurità che vengono rilasciate man mano che la pressione diminuisce. Si parla cioè di "degassamento".

A questo punto, si può isolare il circuito per il vuoto chiudendo le opportune valvole, aprendo invece quelle per connettere la bombola di propano. Sempre nell'ottica di "pulire" il detector da eventuali impurità, vengono effettuati i cosiddetti lavaggi: si riempie il circuito di propano (utilizzando la valvola micrometrica, per non tornare ad alte pressioni), per poi connettere nuovamente le pompe a vuoto per svuotarlo dal propano possibilmente contenente tali contaminanti. Si ripete il procedimento un paio di volte.

Ora è possibile effettuare il riempimento definitivo di propano: si utilizza la valvola micrometrica per dosare la quantità di propano in ingresso, fino a raggiungere una pressione di circa 17 mbar (controllata attraverso il manometro presente), che corrisponde ad un volume simulato di circa  $2 \mu\text{m}$ . Si ricorda che lo scopo delle misurazioni con EuTEPC qui è solo un collaudo, pertanto non c'è necessità di avere un preciso valore di pressione che corrisponda ad un volume simulato particolarmente significativo: basta che la pressione sia nel range utile per effettuare misurazioni.

Viene quindi sigillato il circuito attraverso le valvole, in modo da mantenere questa pressione. Questo setup viene mantenuto per qualche ora, per assicurarsi che la pressione si stabilizzi: grandi variazioni infatti potrebbero indicare delle perdite.

Una volta assicurata la stabilità della pressione è possibile mandare in tensione il microdosimetro per effettuare le misurazioni.

L'apparato lavora alle alte tensioni, per cui si utilizza il modulo di alta tensione brevemente descritto precedentemente. Per raggiungere la tensione desiderata si effettua una rampa di salita, per permettere alla plastica di stabilizzarsi ed evitare sbalzi di tensioni troppo elevati che potrebbero danneggiare lo strumento.

Il software utilizzato per questa operazione è Geco<sup>12</sup>, che permette di regolare la tensione in ingresso automatizzando la salita in tensione graduale. La rampa è stata di  $2 \text{ V/s}$ <sup>13</sup>, intervallata ogni 100 V da alcuni secondi di pausa.

Una volta arrivato alla tensione desiderata, EuTEPC è pronto per prendere

---

<sup>11</sup>ho segnato un 4 luglio in cui era stato messo in vuoto, lunedì 8 abbiamo fatto la calibrazione, giusto?

<sup>12</sup>riuscite a fornirmi il nome completo?

<sup>13</sup>ricordo bene?

misure.

L'ultimo passaggio è la calibrazione della catena elettronica: l'output della catena elettronica infatti non fornisce necessariamente ciò che corrisponde all'input. In particolare un segnale in mV nei vari passaggi tra rivelatore (che genera il segnale), preamplificatore (che legge il segnale) e convertitore ADC viene alla fine restituito come conteggi registrati per ogni canale che l'ADC mette a disposizione. Si vuole quindi avere una funzione, una curva caratteristica, che mette in relazione i voltaggi inviati con i canali in uscita sollecitati. Si presuppone di avere a che fare con un sistema lineare, quindi la curva caratteristica dovrebbe essere una retta.

Si utilizza dunque un emulatore (CAEN DT5800D digital detector emulator), un dispositivo che simula in ingresso alla catena elettronica (in realtà in ingresso al preamplificatore) un segnale, in particolare un picco (una delta di Dirac), a vari mV. In questo modo si conosce esattamente quali siano stati i segnali in ingresso, ed è possibile capire come i segnali inviati siano recepiti ed elaborati dalla catena elettronica, che li registra in fine nei vari canali dell'ADC.

Vengono emulati più picchi distanziati tra loro, in modo da avere più punti per calibrare (ossia interpolare con un fit lineare).

In uscita alla catena è collegato il già citato MAESTRO, che acquisisce i dati ricevuti dall'ADC. Si ricorda che gli output sono in realtà 2, uno per ognuno dei canali settati ad un diverso guadagno. Pertanto le curve caratteristiche con cui calibrare saranno 2.

Il software MAESTRO fornisce quindi i conteggi ottenuti per ogni canale. Naturalmente, ogni picco avrà una sua ampiezza, seppur minima. Dato che si vuole cercare qual è l'esatta posizione (l'esatto canale) in cui il picco di data tensione è ricaduto, e poiché il picco non è una delta di Dirac perfetta, occorre effettuare dei fit gaussiani in modo da individuare il centroide di ogni picco, che sarà dunque il canale corrispettivo ai mV inviati per il corrispettivo picco. Quest'operazione è facilmente effettuabile attraverso il software MAESTRO.

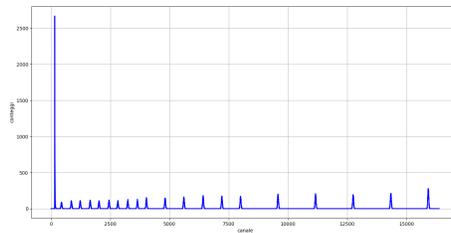


Figura 2.14: Esempio di picchi emulati rilevati

Si può ora effettuare il fit lineare tra queste due quantità individuate (centroidi e mV emulati). In particolare, il fit è pesato: poiché gli spettri finali avranno una rappresentazione con una scala logaritmica in ascissa, si vuole ottenere un errore costante in logaritmico (in modo da dare pari dignità ad una variazione su un segnale grande e su un segnale piccolo), ergo quello che in lineare deve rimanere costante è l'errore relativo. Questo è realizzabile usando un fit pesato. In particolare, ogni dato viene pesato per se stesso (ossia l'errore è il 100% del dato).

I 2 fit risultanti costituiscono quindi la curva caratteristica che è possibile usare per calibrare correttamente gli spettri.

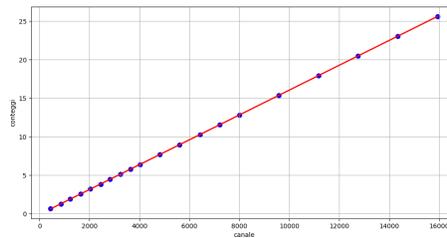


Figura 2.15: Esempio di interpolazione lineare dei segnali in mV in funzione dei canali

È possibile ora passare alle effettive misure. La misura forse più importante è quella della sorgente gamma di riferimento (qui si utilizzerà il Cesio-137): effettuando una misura della sorgente all'inizio e alla fine del periodo della misurazione di interesse (in questo caso del fondo ambientale) ci si può assicurare infatti che il funzionamento del microdosimetro sia rimasto lo stesso per tutta la durata delle misurazioni confrontando i risultati delle due misure gamma. Lo spettro della sorgente di riferimento è infatti noto, pertanto se sia all'inizio che alla fine del periodo di misura la risposta dello strumento alla sorgente gamma è quella che ci si aspetta, si può essere sufficientemente confidenti che la misura avvenuta in quel lasso di tempo non abbia subito malfunzionamenti da parte dello strumento.

La misura della sorgente gamma viene effettuata ponendo un campione di Cesio-137 vicino alla sorgente, e lasciando in misura per un paio d'ore.<sup>14</sup> Gli spettri saranno mostrati ed adeguatamente commentati nel prossimo capitolo.

<sup>14</sup>qui noi abbiamo fatto la seconda gamma dopo un secondo refill se non erro. cito che è stato fatto un refill? se si, ricordate quando è stato fatto? dopo il fondo ma prima della seconda gamma? o forse tra la prima gamma e la misura del fondo?

A questo punto è possibile misurare il fondo: in questo caso la presa dati è durata in totale 2 settimane (dal 17 al 29 luglio 2024), in modo da raccogliere sufficienti statistiche. MAESTRO è stato settato in modo da raccogliere e salvare gli spettri per la prima settimana ogni 6 ore, e per la seconda ogni ora, in modo da poter analizzare gli spettri parziali.

# Capitolo 3

## Risultati sperimentali

Si riportano qui i risultati dell'analisi dei vari dati, dandone una interpretazione alla luce dei procedimenti usati per arrivare a tali risultati. Si discuteranno ad esempio le correzioni applicate ai dati di telescopio e piastre, in modo da rimuovere la dipendenza da temperatura e pressione, e il loro confronto con dati disponibili in letteratura. Per i dati sul Radon si evidenzierà semplicemente la differenza tra l'esterno e l'interno della galleria dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso, non potendo estrapolare altre informazioni a causa dell'imprevedibilità del sistema di aerazione della galleria, il cui funzionamento verrà in parte approfondito. L'analisi degli spettri del microdosimetro darà informazioni circa la risposta dello strumento a una sorgente gamma, e verranno poi mostrati i risultati del fondo ambientale, confrontandoli con altre misure del fondo prese in altri momenti, allo scopo di verificare il corretto funzionamento del microdosimetro.

Prima di passare all'analisi dati, si dedicherà qualche parola sugli strumenti informatici usati.

### 3.1 Python per il calcolo scientifico

Per l'analisi dei vari set di dati è stato utilizzato Python, linguaggio di programmazione che fornisce numerose librerie per il trattamento dei dati.

Numpy pone le fondamenta del calcolo scientifico in Python: essa fornisce infatti a tutte le altre librerie la struttura dati di base per la memorizzazione e la manipolazione efficiente dei dati, ossia il Numpy Array. Pandas utilizza questo oggetto di base per rappresentare il Dataframe, di fatto un Numpy Array che permette però di

immagazzinare dati strutturati, come date e numeri, in un unico oggetto attraverso colonne etichettate ed eterogeneità dei tipi di dati ammessi. I Dataframe si sono rivelati necessari per poter operare efficientemente in contemporanea su milioni di dati, ad esempio per calcolare medie o varianze per dati di muoni e radon, o per operare sulle misure del microdosimetro sfruttando dove necessario le funzioni per il calcolo scientifico avanzato di Scipy come fit, interpolazioni ed integrazioni numeriche. Infine, la generazione dei grafici è a cura di Matplotlib.

## 3.2 Confronto del flusso di muoni all'esterno e all'interno della galleria del LNGS

Per verificare un abbattimento del flusso di muoni all'interno della galleria del Gran Sasso si analizzano i dati raccolti dalle piastre accoppiate precedentemente descritte, alla ricerca di una eventuale diminuzione del numero di muoni rilevati all'interno della galleria rispetto che all'esterno.

Si precisa che lo strumento di misura fornisce rilevazioni ad ogni minuto, di conseguenza si osserva una certa variabilità dei dati. Per questo ne vengono calcolate medie giornaliere, ed è su queste che tutte le elaborazioni di seguito vengono basate.

Di seguito, in figura 3.1 e 3.2, viene presentato l'andamento del flusso di muoni medio giornaliero rispettivamente all'interno e all'esterno della galleria, in una serie temporale che va complessivamente dal 14 dicembre 2023 al 6 giugno 2024.

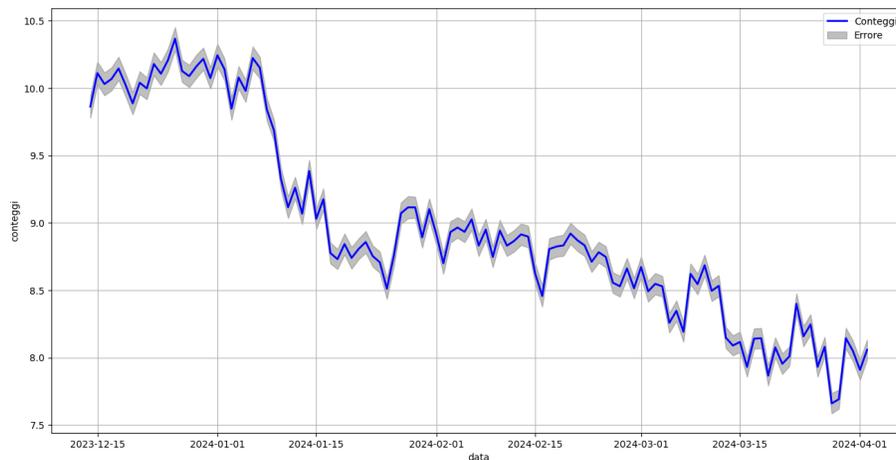


Figura 3.1: Andamento temporale dei conteggi medi (periodo in galleria)

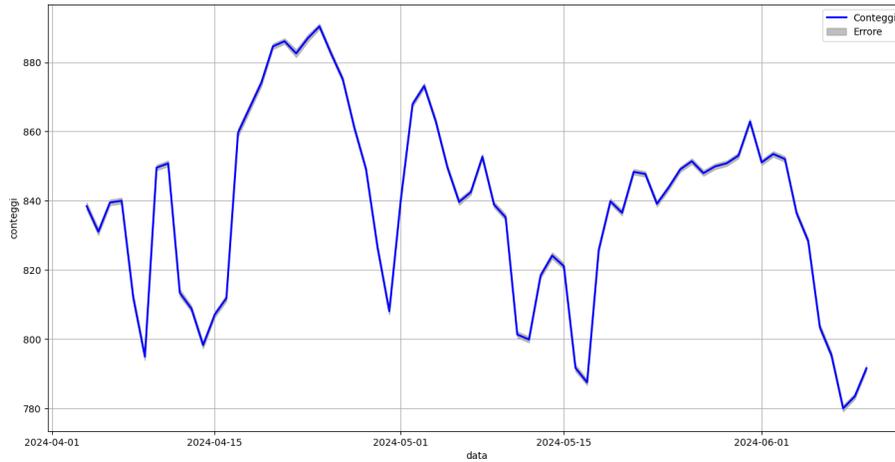


Figura 3.2: **Andamento temporale dei conteggi medi (periodo fuori galleria)**

**Si riportano** le medie del flusso di muoni interno ed esterno alla galleria, che mostrano come sia presente una loro riduzione al di sotto della montagna:

Tabella 3.1: **Medie interne ed esterne** alla galleria del Gran Sasso per il flusso di muoni rilevato dalle piastre

Locazione	Media	Errore della media
In galleria	8.963	0.008
Fuori galleria	836.81	0.14

**Questo controllo è utile ai fini dell'esperimento Discover22, per confermare che effettivamente in galleria si ha un abbattimento di un fattore qui misurato di circa  $10^{-2}$ . Rilevante è il fatto che comunque lo strumento utilizzato non è tarato in assoluto, pertanto le misurazioni portano con sé di sicuro un offset, un errore sistematico, dunque il tentativo di misurare l'abbattimento con bassi valori di muoni si scontra in parte con un limite intrinseco dello strumento.**

~~Comunque sia, un abbattimento è di sicuro presente.~~

~~Si vuole tuttavia avere una comprensione della dinamica dell'andamento dei muoni quanto più completa possibile, allo scopo di monitorare consapevolmente eventuali anomalie. Per questo motivo si analizza ora il comportamento dell'evoluzione temporale del conteggio dei muoni.~~

Si nota infatti una certa variabilità dei dati, soprattutto nel periodo fuori galleria. Si è già argomentato nel capitolo precedente come temperatura e pressione possano influenzare sensibilmente il conteggio dei muoni: si tenta dunque di eliminare la loro dipendenza attraverso una correzione lineare. L'idea è quella di verificare la correlazione lineare tra le due variabili e applicare un fattore correttivo a tutti i dati, in modo da rendere la correlazione quanto più bassa possibile.

Se cioè la variabile  $y$  dipende linearmente da  $x$  si ha una relazione lineare del tipo:

$$y(x) = mx + q$$

dove  $m$  è il fattore di proporzionalità o coefficiente angolare e  $q$  l'offset iniziale o intercetta.

Se questo è il caso, ad ogni  $y$  si sommerà una correzione:

$$y_{corr}(x) = m(c - x) \tag{3.1}$$

con  $c$  il centro di correzione (la cui scelta è, di norma, il valore medio del disturbo).

Ossia:

$$y(x) + y_{corr}(x) = mx + q + m(c - x) = mx + q + mc - mx = mc + q = cost \tag{3.2}$$

In questo modo si rende  $y$  indipendente da  $x$ : se anche  $c$  è un suo cambiamento,  $y$  rimane costante alle sue variazioni.

Si può osservare che in realtà la relazione tra conteggi e pressione o tra conteggi e temperatura non è lineare, ma nel primo caso si ha una relazione esponenziale<sup>6</sup> mentre nel secondo caso la relazione è più complessa, in quanto coinvolge il meccanismo di funzionamento dei SiPM, quindi il comportamento dei semiconduttori a diverse temperature e in diversi regimi. Pertanto per la coppia di variabili conteggi-pressione, si decide di sviluppare in serie di Taylor la loro relazione e utilizzarne solo il primo termine, riducendosi quindi ad una relazione lineare. Per l'altra coppia di variabili si suppone che in prima approssimazione la relazione possa essere considerata lineare, e si verifica a posteriori che questa approssimazione utilizzata sia soddisfacente.

La correzione dei dati si riduce quindi all'individuazione del fattore di relazione lineare  $m$  che lega le due coppie di variabili.

Si presenta però un problema dato dal fatto che i conteggi dipendono da entrambe le quantità: questo significa che le variazioni di  $y$  possono essere causate in contemporanea da variazioni sia dell'una che dall'altra variabile, e questo si traduce in una

difficoltà nell'individuazione dei reali parametri che governano le due correlazioni separatamente.

Una possibile strategia è quindi quella di trovare periodi di tempo in cui una variabile è circa costante e l'altra varia in maniera ampia. In questo modo, eventuali variazioni dei conteggi dei muoni sono necessariamente dovute alla variabile che varia, essendo l'altra variabile costante. Questo permette di avere una buona confidenza sulla bontà dei parametri di correlazione individuati.

La campagna di misure qui presentata è tuttavia relativamente breve e non si hanno a disposizione periodi sufficientemente lunghi che presentino le condizioni descritte. In questo caso quindi si utilizzeranno tutti i dati presenti, non potendo fare altrimenti.

~~Una volta identificati gli  $m$  attraverso una media pesata se ne ricava una stima unica, e questo sarà il valore utilizzato per la correzione.~~

~~A questo punto, i dati corretti presenteranno una più bassa dipendenza dalle variabili ambientali (come dimostrato dall'equazione (3.2)).~~

Di seguito si presentano i risultati delle correlazioni.

In figura 3.3 e 3.4 vengono mostrati i grafici di correlazione tra le due coppie di dati, con l'interpolazione lineare e il coefficiente di correlazione  $r^2$ .

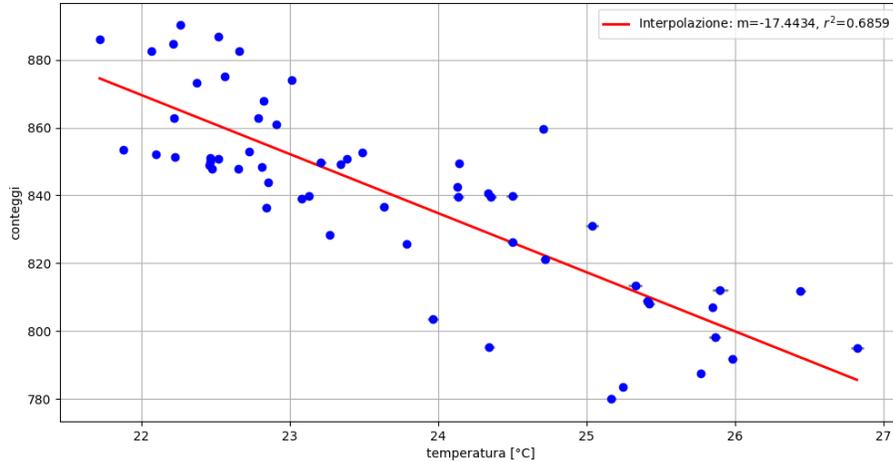


Figura 3.3: Relazione tra conteggi medi e temperatura con interpolazione (periodo fuori galleria)

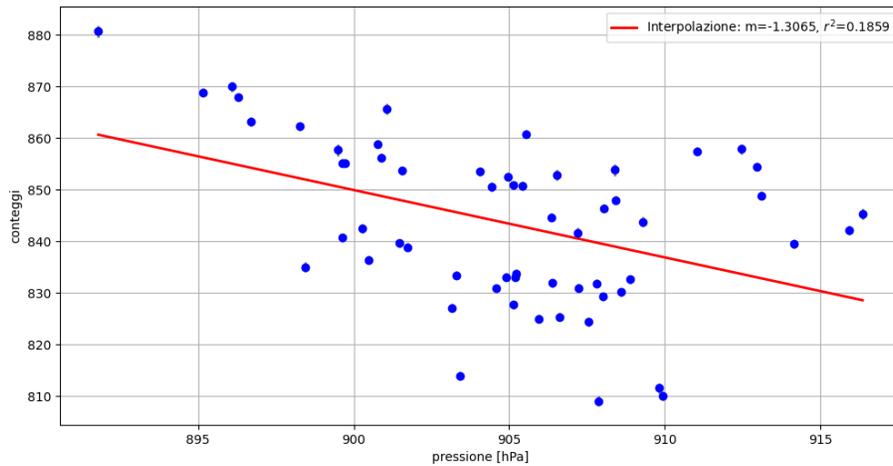


Figura 3.4: Relazione tra conteggi medi e pressione con interpolazione (periodo fuori galleria)

Le seguenti tabelle riportano i valori di  $m$  (e relativi errori assoluti) calcolati per i dati delle piastre al Gran Sasso.

Tabella 3.2: Valore di  $m$  per la correlazione conteggi-temperatura (dati delle piastre al Gran Sasso, periodo in galleria)

$m$	$\sigma_m$	$r^2$
-0.7393	0.0412	0.7993

Tabella 3.3: Valore di  $m$  per la correlazione conteggi-pressione (dati delle piastre al Gran Sasso, periodo in galleria)

$m$	$\sigma_m$	$r^2$
-0.0020	0.0025	0.0073

Tabella 3.4: Valore di  $m$  per la correlazione conteggi-temperatura (dati delle piastre al Gran Sasso, periodo fuori galleria)

$m$	$\sigma_m$	$r^2$
-17.4434	1.5637	0.6859

Tabella 3.5: Valore di  $m$  per la correlazione conteggi-pressione (dati delle piastre al Gran Sasso, periodo fuori galleria)

$m$	$\sigma_m$	$r^2$
-1.3065	0.3622	0.1859

Si nota che i coefficienti di correlazione per la temperatura sono relativamente alti, sia all'esterno che all'interno della galleria: questo dimostra a posteriori, come ci si era prefissati precedentemente, che la relazione lineare è una buona approssimazione per il comportamento dei SiPM rispetto alla temperatura.

In secondo luogo si fa notare che non sembra esserci una correlazione tra conteggi e pressione per il periodo in galleria: oltre ad un fattore  $r^2$  molto vicino a 0, l'errore  $\sigma_m$  è maggiore del valore di  $m$  stesso. Non si effettuerà pertanto nessuna correzione per questa variabile ai dati in galleria.

Infine, si precisa che il calcolo della correlazione (sia per la temperatura che per la pressione) è stato effettuato eliminando alcune misure, poiché dai grafici di correlazione era presente un subset di dati (figura 3.5) evidentemente scollegati da tutti gli altri. Questo subset corrisponde alle misure fino al 10 gennaio: anche dalla figura 3.1 risulta infatti evidente una brusca diminuzione dei conteggi intorno a quella data. Si approfondirà questo aspetto in seguito.

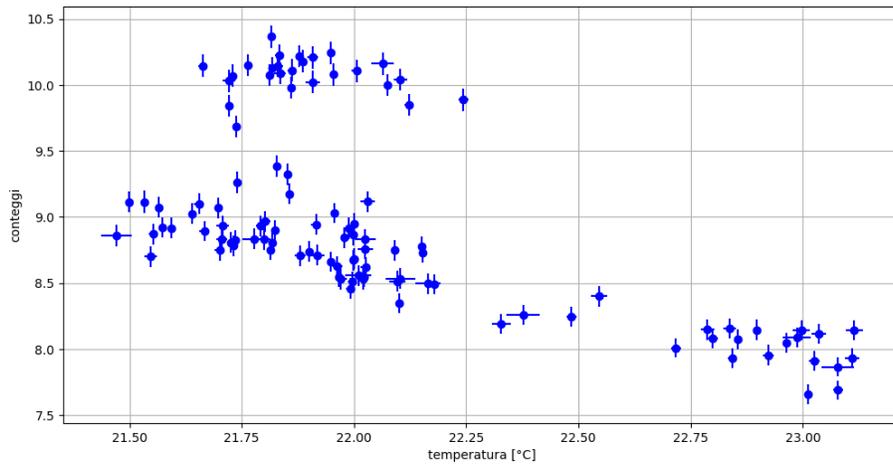


Figura 3.5: Relazione tra conteggi medi e temperatura (periodo in galleria)

Ora, applicando come fattori correttivi  $c$  i valori  $m$  appena individuati, si ottengono i seguenti grafici corretti.

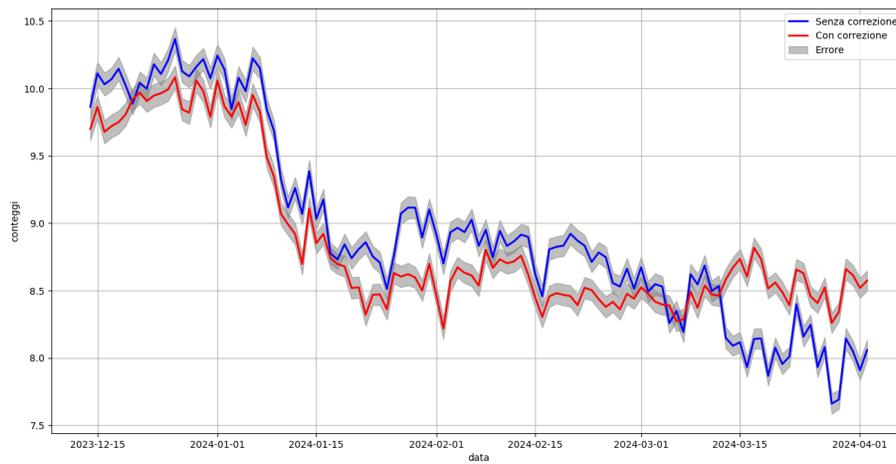


Figura 3.6: Andamento temporale dei conteggi medi con e senza correzione (periodo in galleria)

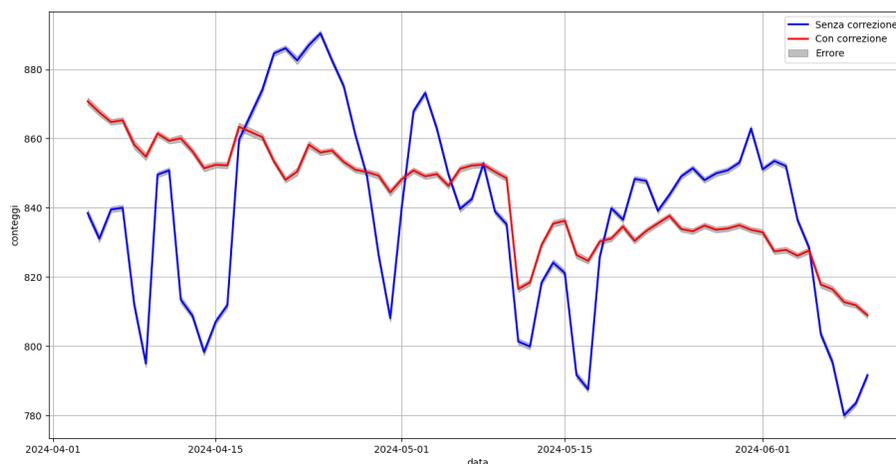


Figura 3.7: Andamento temporale dei conteggi medi con e senza correzione (periodo fuori galleria)

~~Nel caso in galleria si evidenzia come dal 10 gennaio in poi esistesse un trend decrescente ora non più presente, che evidentemente era proprio causato dalla temperatura.~~

~~La brusca diminuzione già osservata che si ha intorno al 10 gennaio...~~<sup>1</sup>

Le misure fuori galleria invece erano molto variabili, e la correzione ha evidentemente ridotto tali variazioni. Oltre ad un trend decrescente <sup>2</sup> si nota una brusca diminuzione in corrispondenza dell'11 maggio, non spiegata dalla dipendenza di temperatura e pressione. Questo andamento, con un'iniziale brusca diminuzione e seguito poi da una più lenta ripresa, è il profilo tipico (che verrà meglio approfondito successivamente) della manifestazione dell'effetto Forbush, fenomeno dovuto ad una intensa attività solare che ha effettivamente avuto luogo in quella data.

La prossima sezione è specificatamente dedicata alla verifica della presenza dell'effetto Forbush in occasione dell'11 maggio 2024.

<sup>1</sup>Come argomento qua?

<sup>2</sup>come lo spiego?

### 3.3 Rilevazione dell'effetto Forbush durante la tempesta geomagnetica di maggio 2024

Per effetto Forbush si intende una diminuzione del flusso di muoni a seguito di una intensa attività solare.<sup>3</sup>

La verifica dell'effetto Forbush è la rilevazione di una diminuzione del flusso di muoni in corrispondenza di un periodo con una intensa attività solare: si può pertanto controllare se ad una diminuzione dei conteggi corrisponde un aumento del  $Kp$ , grandezza indicativa dell'attività solare<sup>4</sup> calcolata basandosi sulle deviazioni del campo geomagnetico (rispetto al suo valore medio) registrate da 13 osservatori diversi.<sup>5</sup>

Ci si avvale, oltre che delle piastre accoppiate localizzate in quel periodo al Gran Sasso, anche di uno strumento simile posto invece ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), a cui ci si riferirà con "telescopio per muoni" o "telescopio".

Questa configurazione (figura 3.8) presenta le due piastre separate da 72 cm con interposta una piastra di ferro, in modo da abbattere eventuali altre particelle non molto energetiche che possono causare coincidenze spurie. Il supporto su cui è installato questo setup è dotato di ruote ed è possibile farlo ruotare in modo da orientare le piastre secondo un certo angolo rispetto alla normale, in modo da poter scegliere l'angolazione del flusso di muoni da registrare.

---

<sup>3</sup>Metto qui un po di teoria sull'effetto forbush?



Figura 3.8: Telescopio, in questo caso inclinato di un certo angolo

Si presentano ora le misure dei due strumenti.

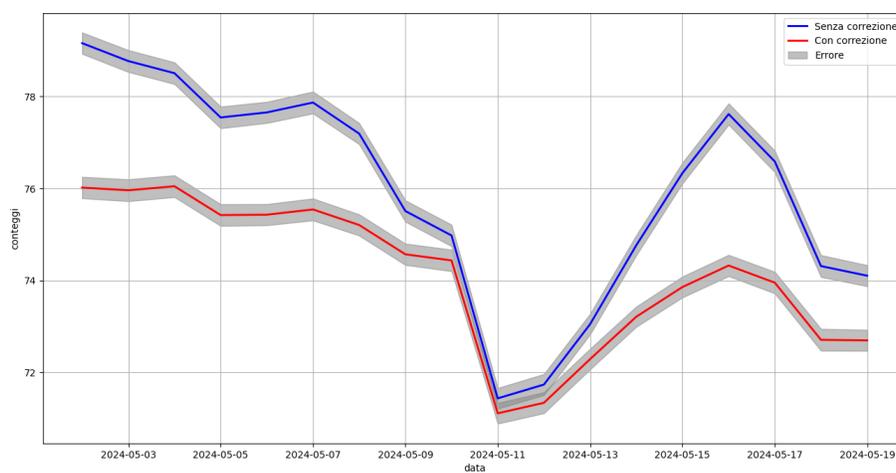


Figura 3.9: Andamento temporale dei conteggi medi con e senza correzione nel periodo di interesse (dati del telescopio a LNL)



Figura 3.10: Andamento temporale dei conteggi medi con e senza correzione nel periodo di interesse (dati delle piastre a LNGS a circa 1000 s.l.m.)

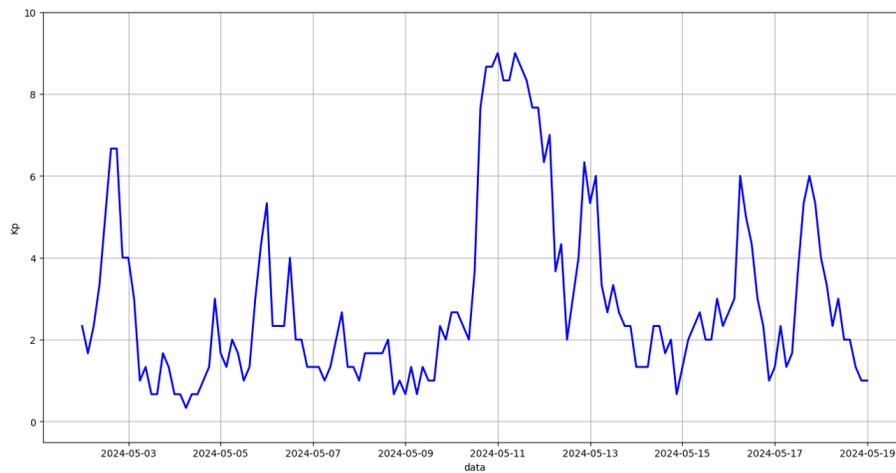


Figura 3.11: Andamento temporale dell'indice Kp nel periodo d'interesse

I grafici mostrati presentano il flusso di muoni medio giornaliero in una serie temporale che va dal 2 al 19 maggio 2024, rispettivamente per i dati recuperati dal telescopio e dalle piastre. Il set di dati presentati in blu indicano quei dati senza alcuna elaborazione (se non il calcolo delle medie giornaliere), mentre quelli presentati in rosso sono quei dati a cui è stata applicata la correzione descritta nella sezione precedente. Il terzo grafico invece rappresenta l'andamento medio (nello

stesso intervallo temporale) dell'indice  $Kp$ , dove in data 11 maggio si nota un picco (a 9) e in corrispondenza della quale è effettivamente presente una sensibile diminuzione del flusso di muoni (di circa il 5%) in entrambi i primi due grafici.

Due aspetti qui necessitano una discussione.

In primo luogo si osserva come l'andamento del flusso di muoni nell'intorno della data di interesse sia caratterizzato in entrambi i grafici (quindi sia a Legnaro con le misure del telescopio che al Gran Sasso con le misure delle piastre) da una brusca diminuzione ed una successiva ripresa più lenta. Questo è infatti l'andamento tipico del flusso di muoni in presenza di effetto Forbush: altri studi in letteratura<sup>7-9</sup> mostrano la modalità nella quale tale fenomeno si manifesta, ed effettivamente essi confermano quanto osservato nelle immagini 3.9 e 3.10. Si riportano per paragone delle immagini provenienti da tali ricerche.

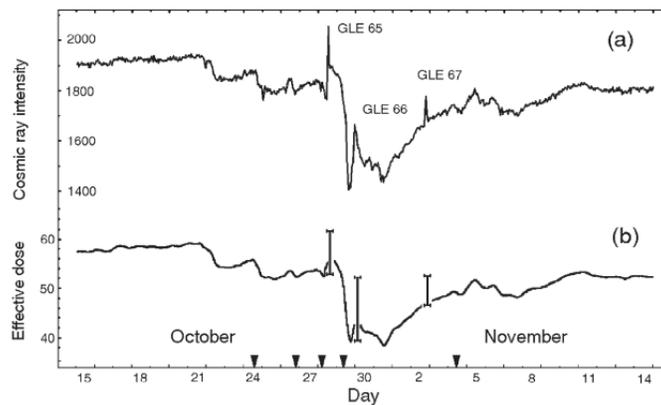


Figura 3.12: Grafico che mostra la ripresa lenta del flusso di muoni dopo un evento di alta attività solare<sup>9</sup>

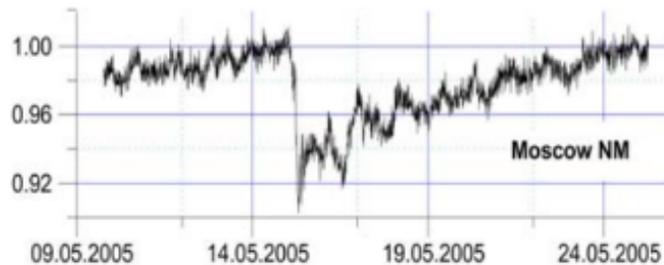


Figura 3.13: Grafico che mostra la ripresa lenta del flusso di muoni dopo un evento di alta attività solare<sup>7</sup>

Una discussione a parte merita invece la correzione: a partire dai risultati delle correlazioni se ne discuterà per verificarne la bontà, provando così la credibilità della verifica dell'effetto Forbush qui presentata ed osservata in base alla diminuzione del flusso di muoni intorno all'11 maggio 2024.<sup>4</sup>

Si precisa anzitutto che i periodi scelti per calcolare le correlazioni tra le coppie di variabili spaziano temporalmente tutte le stagioni: è importante sottolinearlo in quanto i fattori  $m$  per la correlazione dei conteggi con la pressione sono molto variabili a seconda della stagione, come mostrato nell'articolo in citazione.<sup>10</sup> Se ne riporta di seguito una tabella:

Tabella 3.6: Valori di  $m$  nei vari mesi dell'anno per la correlazione conteggi-pressione (dati dell'articolo in citazione<sup>10</sup>)

Mese	$m$	$\sigma_m$
Gennaio	-0.17	0.11
Febbraio	-0.17	0.05
Marzo	-0.15	0.05
Aprile	-0.18	0.11
Maggio	-0.18	0.09
Giugno	-0.17	0.11
Luglio	-0.19	0.08
Agosto	-0.29	0.21
Settembre	-0.19	0.12
Ottobre	-0.28	0.15
Novembre	-0.19	0.12
Dicembre	-0.18	0.06

Questo evidentemente porta ad avere dei valori per  $m$  che possono essere contrastanti: questo sarà discusso successivamente.

Le seguenti tabelle riportano i valori di  $m$  (e relativi errori assoluti) con i corrispondenti periodi (per identificare la stagione a cui i dati appartengono). Le prime due fanno riferimento ai dati del telescopio a Legnaro, rispettivamente per correlazione conteggi-pressione e conteggi-temperatura, mentre le seconde ai dati delle piastre al Gran Sasso fuori galleria, con lo stesso ordine. Quest'ultime non hanno la

<sup>4</sup>il problema di mettersi a parlare dei risultati è che secondo me potrebbe far sorgere una domanda: perché non è stato fatto nella sezione prima, dove per lo scopo della tesi era realmente importante? la verifica dell'effetto forbush d'altronde è diventata un argomento "a lato"

distinzione in periodi, poiché come discusso precedentemente le misure non si sono protratte così a lungo per permettere di individuare diversi periodi per il calcolo delle correlazioni.

Tabella 3.7: Valori di  $m$  nei vari periodi per la correlazione conteggi-pressione (dati del telescopio a Legnaro)

Inizio	Fine	$m$	$\sigma_m$	$r^2$
2021-08-28	2021-09-12	-0.20	0.03	0.86
2021-10-25	2021-11-02	-0.14	0.02	0.93
2021-12-04	2021-12-21	-0.19	0.01	0.98
2022-08-13	2022-09-17	-0.29	0.04	0.83
2022-09-17	2022-10-27	-0.21	0.02	0.89
2022-12-14	2023-02-05	-0.26	0.01	0.89
2023-12-19	2024-01-09	-0.24	0.01	0.95

Tabella 3.8: Valori di  $m$  nei vari periodi per la correlazione conteggi-temperatura (dati del telescopio a Legnaro)

Inizio	Fine	$m$	$\sigma_m$	$r^2$
2021-06-05	2021-06-18	-1.04	0.15	0.82
2021-06-26	2021-07-20	-0.41	0.13	0.33
2022-05-01	2022-05-17	-0.42	0.10	0.59
2022-07-20	2022-08-13	-0.86	0.19	0.50
2023-04-27	2023-05-14	-0.88	0.23	0.45
2023-05-18	2023-06-19	-0.55	0.04	0.85

Tabella 3.9: Valore di  $m$  per la correlazione conteggi-pressione (dati delle piastre al Gran Sasso)

$m$	$\sigma_m$	$r^2$
-1.3065	0.3622	0.1859

<sup>5</sup>questo è abbastanza diverso da quelli del telescopio, come lo spieghiamo?

Tabella 3.10: Valore di  $m$  per la correlazione conteggi-temperatura (dati delle piastre al Gran Sasso)

$m$	$\sigma_m$	$r^2$
-17.4434	1.5637	0.8859

Si nota innanzitutto che i coefficienti di correlazione per la temperatura sono relativamente alti: questo dimostra a posteriori, come già osservato, che la relazione lineare è una buona approssimazione per il comportamento dei SiPM rispetto alla temperatura.

In secondo luogo i vari valori di  $m$  per la correlazione con la pressione sono discrepanti significativamente, utilizzando il criterio del 5%.<sup>11</sup> Si è tentato di raggruppare i valori in base a diverse affinità, come la stessa stagione, oppure periodi considerati migliori rispetto ad altri poiché la variabile di interesse è particolarmente variabile (quindi un aspetto positivo per il calcolo della correlazione) o l'altra variabile è particolarmente stabile (anche questo è un aspetto positivo, in quanto una sua costanza implica che le variazioni dei conteggi dei muoni non dipendono in alcun modo da essa, ma eventualmente solo da quella d'interesse). Si sono poi testate le discrepanze tra questi gruppi ma in tutti i casi risultano discrepanti significativamente, anche rimuovendo ad esempio gli estremi.

Questo non sembra essere positivo per la verifica della tesi, poiché avere delle stime diverse di  $m$  che non sono compatibili tra loro indica che in qualche modo non sono stime affidabili, rendendo così la correzione un mezzo poco affidabile per la verifica dell'effetto Forbush. Tuttavia quest'evidenza sperimentale è confermata da stime ottenute da altri studi, come quelle già riportate in tabella 3.6. Qui si evidenzia come ad esempio in una stessa stagione  $m$  assuma valori anche estremi, come nel caso di Luglio e Agosto, rispettivamente  $-0.19 \pm 0.08$  e  $-0.29 \pm 0.21$ .

Quindi, come osservato precedentemente e confermato dal risultato delle correlazioni (tabelle 3.7 e 3.8) si hanno valori contrastanti, in parte dovuto alle diverse stagioni in cui gli  $m$  sono calcolati, in parte dovuto evidentemente alla loro natura come testimoniato da altri studi in letteratura. I valori sono comunque in linea con quelli delle ricerche citate, pertanto nonostante discrepanti possono essere considerati relativamente attendibili.

Invece i valori di  $m$  per la correlazione con la temperatura non sono discrepanti (se vengono considerati solo i periodi classificati come migliori in base alle condizioni già specificate), a dimostrazione del fatto che la temperatura della stanza (che è la misura

che si ha a disposizione) che come anticipato influenza molto il funzionamento dei SiPM, è proprio una dipendenza intrinseca del dispositivo, quindi essa è indipendente dalla stagione in cui viene effettuata la misura.

Per ottenere un'unica stima per i fattori di correzione  $m$  si calcola una media pesata delle varie stime a disposizione. In tabella 3.11 sono elencati i valori che vengono effettivamente usati per correggere usando la relazione (3.1).

Tabella 3.11: Fattore di correzione  $c$  per la correlazione conteggi-pressione (dati del telescopio a Legnaro)

Correlazione con	$c$
Pressione	-0.2090
Temperatura	-0.5357

In conclusione, sulla base dei dati a disposizione che effettivamente mostrano una diminuzione sensibile del flusso di muoni in corrispondenza di una data in cui l'indice  $Kp$  per l'intensità dell'attività solare è alto, e sulla base del fatto che la correzione effettuata è compatibile con i fattori di correlazione individuati in altre ricerche, e anche sul fatto che come in altri paper la diminuzione è più brusca della più lenta ripresa, si può con sufficiente sicurezza affermare che la verifica dell'effetto Forbush è consistente.

### 3.4 Confronto delle concentrazioni di Radon all'esterno e all'interno della galleria

L'analisi dati per le concentrazioni di Radon si compone di un semplice controllo degli andamenti temporali mediati giornalmente delle concentrazioni, prima per il periodo in cui il rivelatore è stato in galleria del Gran Sasso, e poi per il periodo fuori galleria.

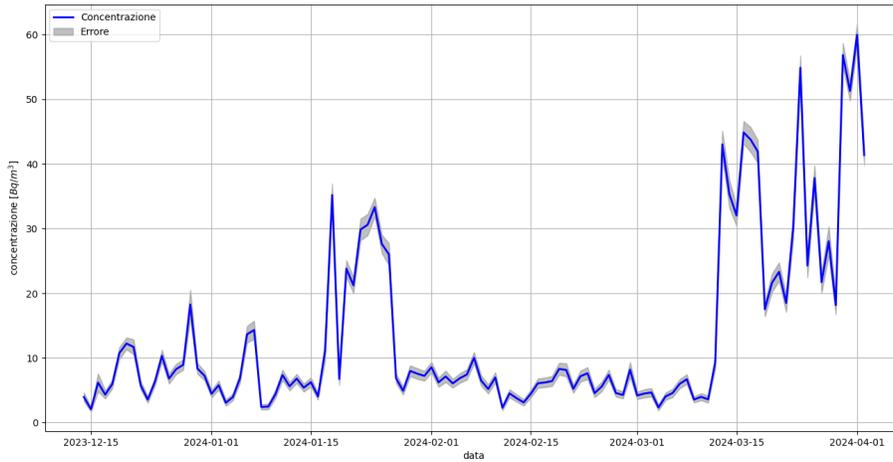


Figura 3.14: Andamento temporale delle concentrazioni medie in galleria

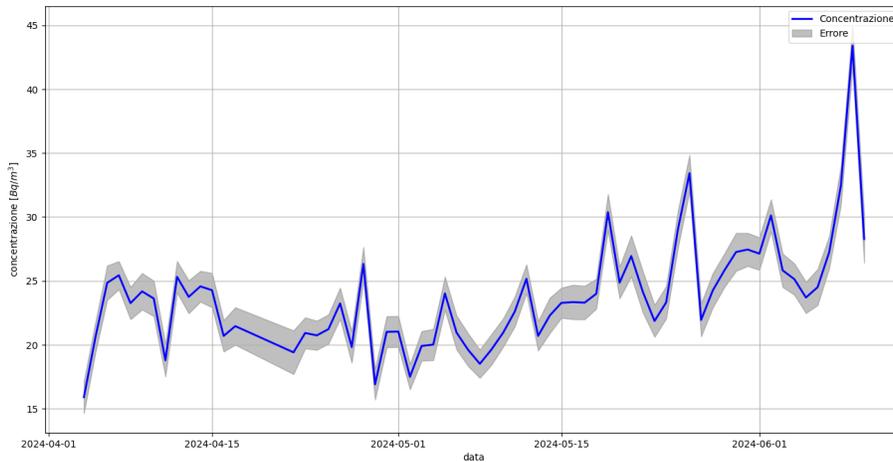


Figura 3.15: Andamento temporale delle concentrazioni medie fuori galleria

Come anticipato, l'andamento del radon ha una correlazione con gli eventi meteorologici esterni. Tuttavia per l'andamento in galleria è difficile osservare una netta correlazione, e questo può essere dovuto al sistema di ventilazione: l'aria insufflata può provenire in realtà da due zone diverse, dai due lati della montagna, ed essendoci da un lato la zona adriatica e dall'altro la zona tirrenica, le condizioni meteorologiche sono ben distinte. Poiché non si ha un tracciamento efficace su quale sia il versante da cui l'aria viene prelevata, è difficile misurare un'influenza sulla concentrazione di radon in galleria.

Si può anche avere anche un ritardo tra ciò che accade fuori e le ripercussioni interne, magari per un rallentamento del flusso d'aria o per il cambio del punto di prelievo dell'aria.

Si nota in generale che le concentrazioni in galleria sono piuttosto basse, salvo in alcuni giorni in cui si registrano delle variazioni anche importanti, che potrebbero essere dovute alle condizioni metereologiche o potrebbero essere legate al funzionamento del sistema di ventilazione.

Nella tabella 3.12 sono mostrate le media globali interne ed esterne alla galleria per verificarne la differenza:

Tabella 3.12: Medie interne ed esterne alla galleria del Gran Sasso per le concentrazioni di Radon

Locazione	Media ( $Bq/m^3$ )	Errore della media ( $Bq/m^3$ )
In galleria	13.49	0.15
Fuori galleria	23.84	0.17

~~Non è possibile quindi per i suddetti motivi fare una analisi più accurata per una correlazione tra eventi atmosferici e concentrazione di Radon, ma è possibile solo dire che una diminuzione significativa in galleria c'è.~~

# Conclusioni

# Bibliografia

- [1] Gabriele Auriemma
- [2] Atlas
- [3] Scintillatori Scionix EJ-200 (<https://scionix.nl/frame/>)
- [4] Geomagnetic Kp index by Potsdam (<https://kp.gfz-potsdam.de/en/>)
- [5] NOAA K-index calculation (<https://swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u2/TheK-index.pdf>)
- [6] Stevanato, L., Baroni, G., Oswald, S. E., Lunardon, M., Mares, V., Marinello, F., et al. (2022). An alternative incoming correction for cosmic-ray neutron sensing observations using local muon measurement. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL095383. <https://doi.org/10.1029/2021GL095383>
- [7] N.S. Barbashina, A.N. Dmitrieva, V.V. Borog, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, G. Mannocchi, A.A. Petrukhin, D. A. Room, O. Saavedra, V.V. Shutenko, D.A. Timashkov, G. Trincherro, I.I. Yashin, (2007). Investigation of Forbush effects in muon flux measured in integral and hodoscopic modes. ICRC 2007, ID 305.
- [8] WenHao Li, JingJing Zang, Qiang Yuan, Chuan Yuea and Xiang Li for the DAMPE collaboration, ChengRui Zhud, (2023). A study of Forbush Decreases effects with DAMPE experiment. ICRC 2023, ID 1311.
- [9] P. Lantos, (2005). Forbush decrease effects on radiation dose received on-board aeroplanes. *Radiation Protection Dosimetry* (2005), Vol. 117, No. 4.
- [10] Maghrabi Abdullrahman, Alzahrani Safiah, and Alruhaili Aied, (2023). The Effect of Atmospheric pressure and temperature on the cosmic rays detected by KAAU muon detector. ICRC 2023, ID 292.

- [11] John R. Taylor, (1999). Introduzione all'analisi degli errori. Lo studio delle incertezze nelle misure fisiche. Zanichelli, Bologna. ISBN 978-8808176561.