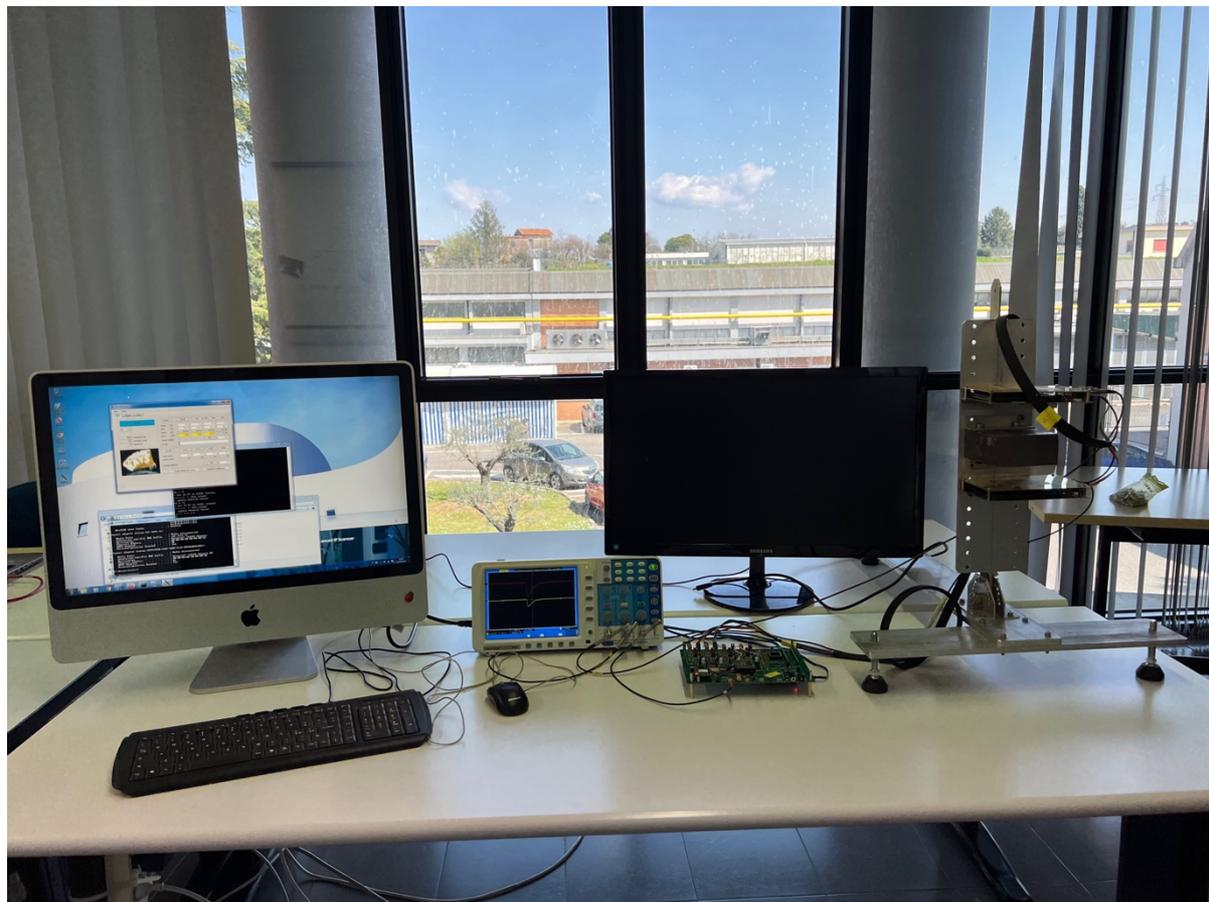
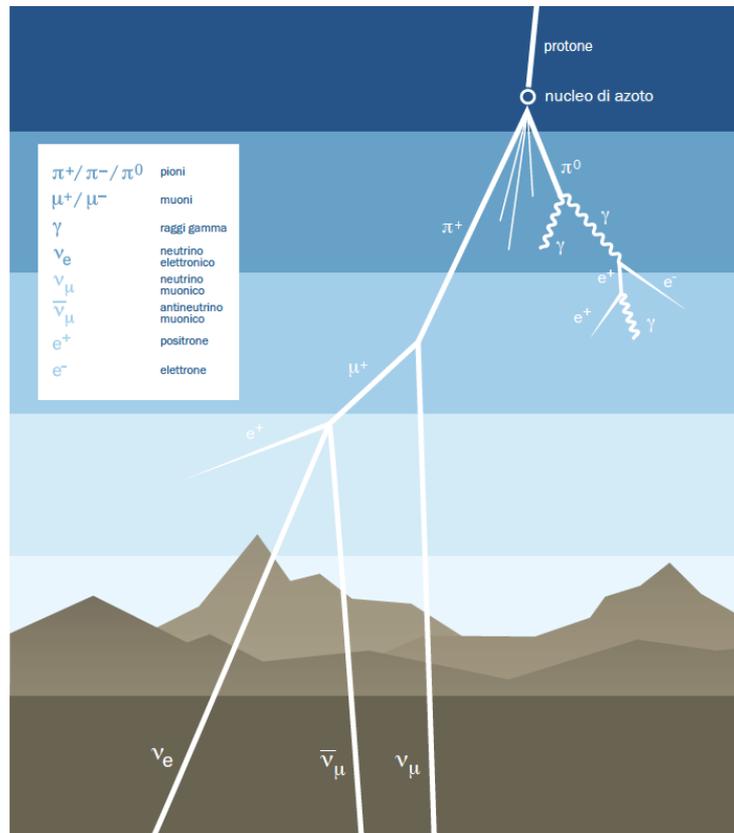


# Manuale Rivelatore Raggi Cosmici



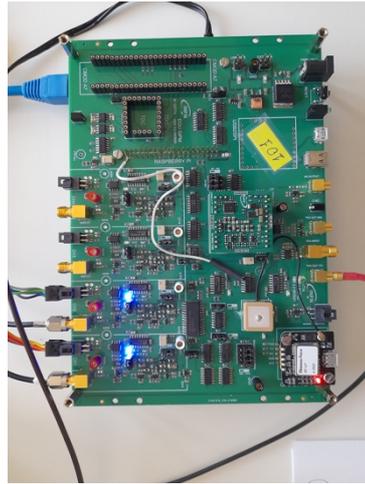
# I Raggi Cosmici



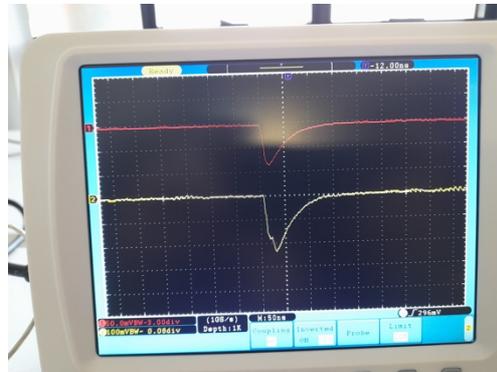
In questa figura, tratta dalla rivista dell'INFN Asimmetrie numero 10 (disponibile su <https://www.asimmetrie.it>), è schematizzato lo sviluppo di uno sciame di Raggi Cosmici, prodotto da una particella primaria, in questo caso un protone, ad un quota di 10-20 Km. La maggior parte della componente carica dei Raggi Cosmici primari è costituita da protoni. Questi possono avere un'energia elevatissima  $10^{20}$  volte maggiore dell'energia della luce visibile. Si ritiene che le sorgenti di queste particelle siano eventi violenti che avvengono nel nostro universo come le esplosioni di Supernova, o da nuclei galattici attivi dove buchi neri risucchiano il gas delle stelle, o i lampi gamma, pulsar etc.

## 1. Il Telescopio per Raggi Cosmici

Il telescopio per raggi cosmici è composto da due mattonelle di scintillatore la cui luce emessa, in corrispondenza al passaggio di un raggio cosmico, è convertita in un impulso elettrico da rivelatori chiamati silicon photomultipliers (SiPM) (figura a sinistra).



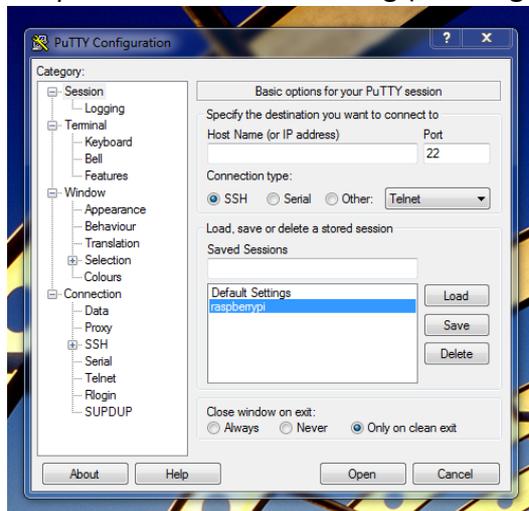
I segnali sono raccolti e elaborati su una scheda di acquisizione (figura a destra).  
E' possibile visualizzare i segnali degli scintillatori con un oscilloscopio:



## 2. Connessione

Per prima cosa occorre collegare un computer al Raspberry Pi presente sulla scheda. Qui riportiamo l'esempio con sistema operativo Windows dove sono stati preinstallati i programmi Xming e Putty.

Per prima cosa lanciare Xming (se non già fatto) e aprire il programma Putty.

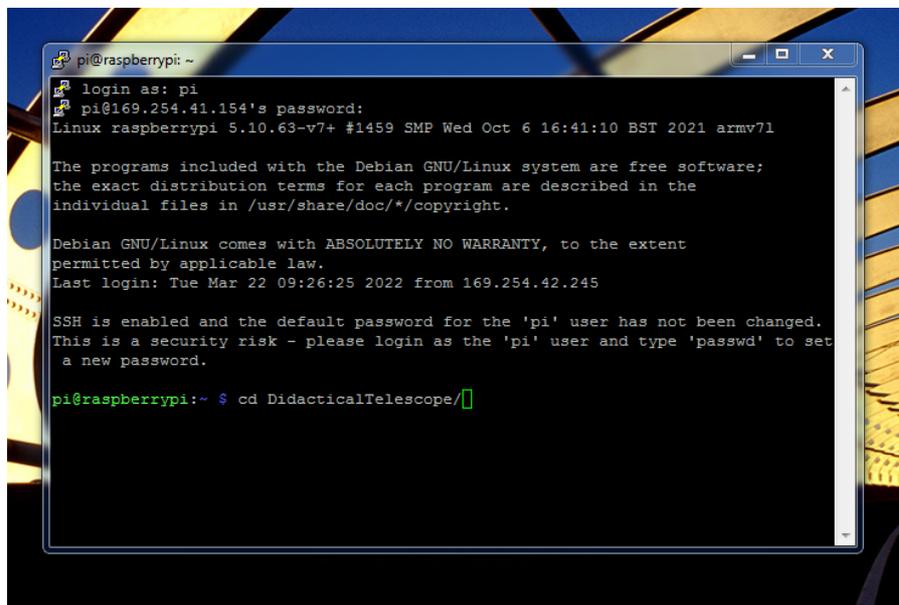


Si apre la finestra riportata a lato. (Se) La connessione (SSH) al Raspberry Pi è stata configurata in precedenza: selezionare "raspberrypi" da "Saved Sessions" e premere il tasto "Open" in basso.

Si apre una finestra di login e inserire:  
login as: pi  
password: raspberry

### 3. Lanciare il programma di acquisizione

Una volta connessi con il Raspberry Pi della scheda di acquisizione avremo davanti la shell dei comandi come in figura:



```
pi@raspberrypi: ~  
login as: pi  
pi@169.254.41.154's password:  
Linux raspberrypi 5.10.63-v7+ #1459 SMP Wed Oct 6 16:41:10 BST 2021 armv7l  
  
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;  
the exact distribution terms for each program are described in the  
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.  
  
Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent  
permitted by applicable law.  
Last login: Tue Mar 22 09:26:25 2022 from 169.254.42.245  
  
SSH is enabled and the default password for the 'pi' user has not been changed.  
This is a security risk - please login as the 'pi' user and type 'passwd' to set  
a new password.  
  
pi@raspberrypi:~$ cd DidacticalTelescope/
```

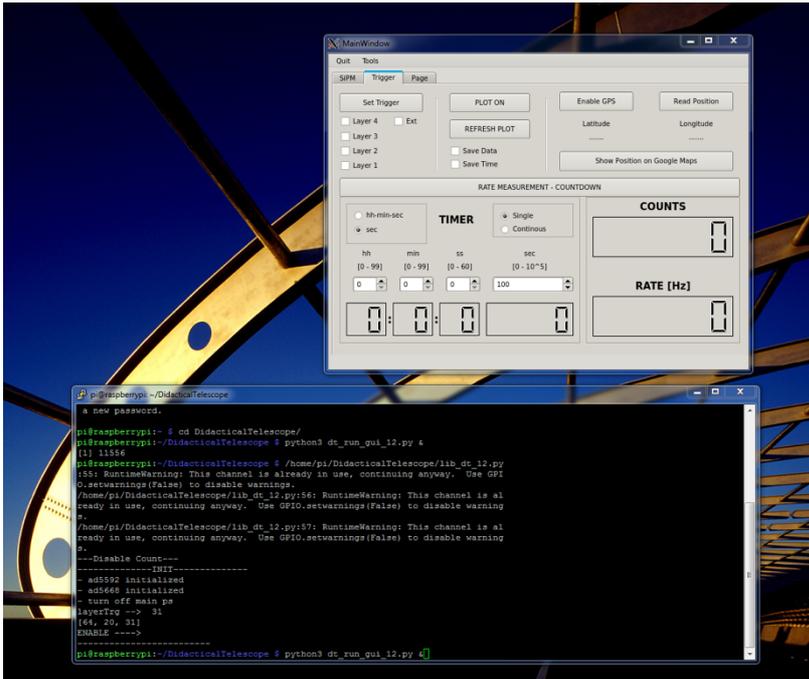
Per lanciare il programma di acquisizione occorre prima cambiare directory. Digitare sulla shell il comando:

- `cd DidacticalTelescope`

quindi:

- `python3 dt_run_gui_12.py &`

A questo punto si aprirà il pannello di controllo del rivelatore di raggi cosmici:



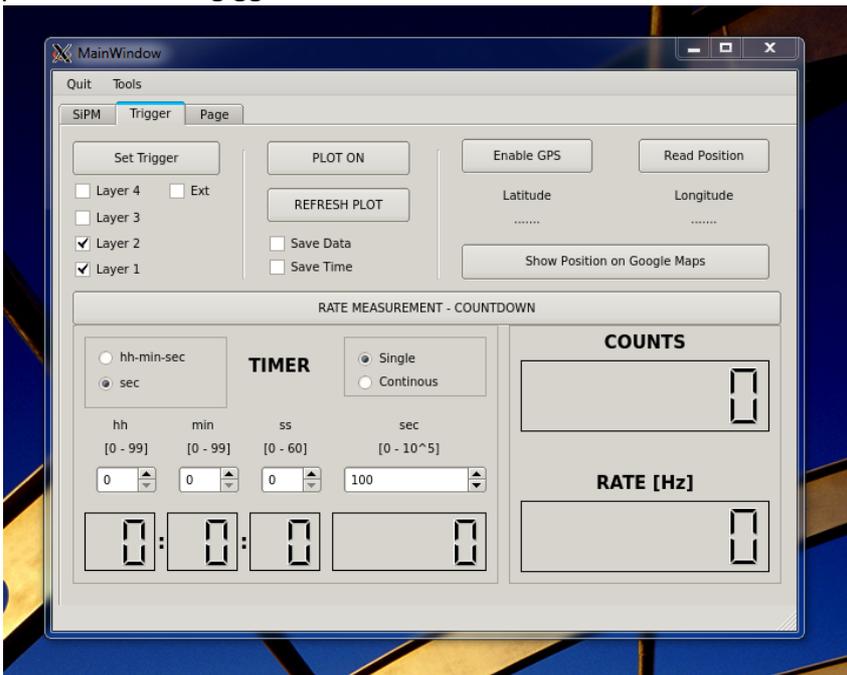
Dal pannello di controllo è possibile selezionare tre diverse pagine: SiPM; Trigger; Page. Siamo interessati alle prime due.

**SiPM:** serve per regolare le tensioni e le soglie di funzionamento dei dispositivi (SIPM Silicon Photomultipliers) che rilevano la luce emessa dagli scintillatori.

**Trigger:** serve per impostare la modalità di funzionamento e di conteggio dei segnali in arrivo dagli scintillatori connessi (fino a 4).

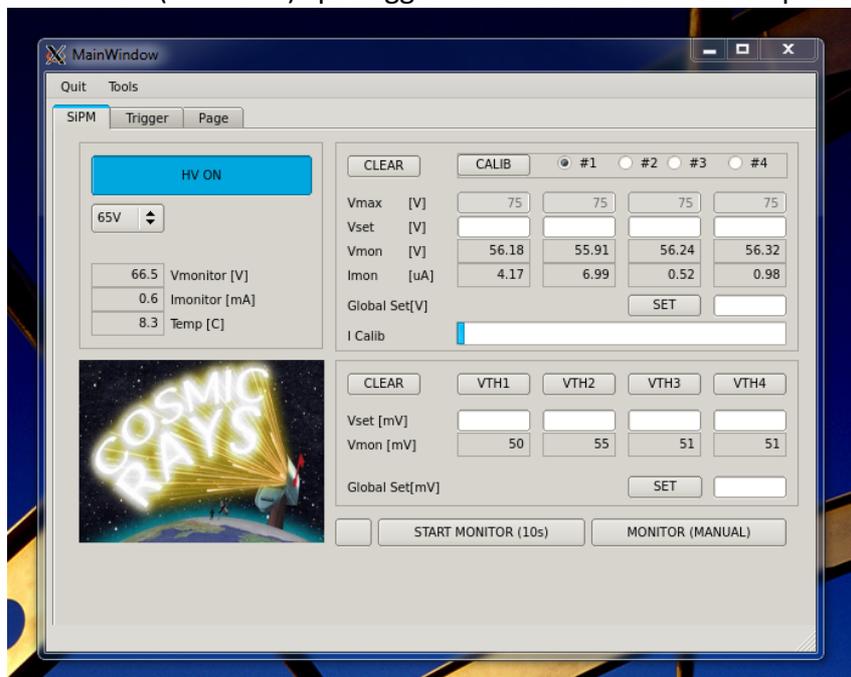
## 4. Impostazione del Trigger

Dalla pagina “Trigger” selezionare “Layer 1” e “Layer 2” per i due scintillatori collegati e premere “Set Trigger”.

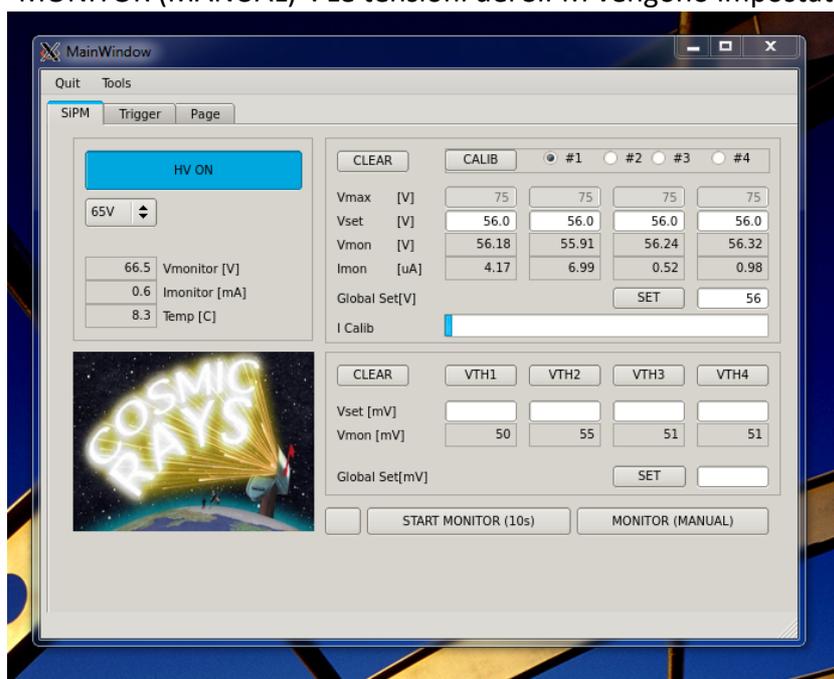


## 5. Impostazione delle tensioni

Dalla pagina “SIPM”, premere “HV OFF” per abilitare la finestra di impostazione della tensione globale, quindi selezionare “65V” dalla finestra a scorrimento, quindi premere “MONITOR (MANUAL)” per aggiornare i dati visualizzati sul pannello.



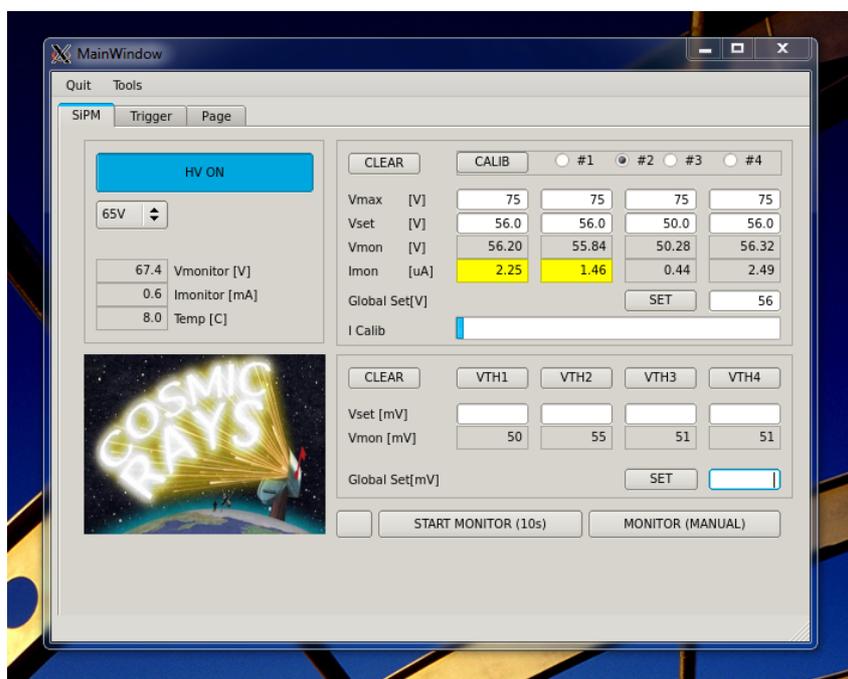
A questo punto dobbiamo impostare le tensioni di lavoro per i SiPM degli scintillatori. Scriviamo “56” nella finestrella a destra, accanto al tasto “SET”, e premiamo “SET” e poi “MONITOR (MANUAL)”. Le tensioni dei SiPM vengono impostate a 56V.



Per modificare le tensioni dei SiPM singolarmente, selezionare il numero di canale (#1,2,3,4) quindi impostare il valore desiderato nella finestrella sottostante e fare “invio” quindi “MONITOR”.

## 6. Calibrazione

Per un corretto funzionamento del dispositivo occorre eseguire una procedura di autocalibrazione del sistema. Selezionare “#1” quindi premere “CALIB” e quando ha finito premere “MONITOR” e ripetere la procedura anche per gli altri scintillatori collegati (nel nostro caso il #2). Una volta finito i valori di “Imon” saranno evidenziati in giallo.



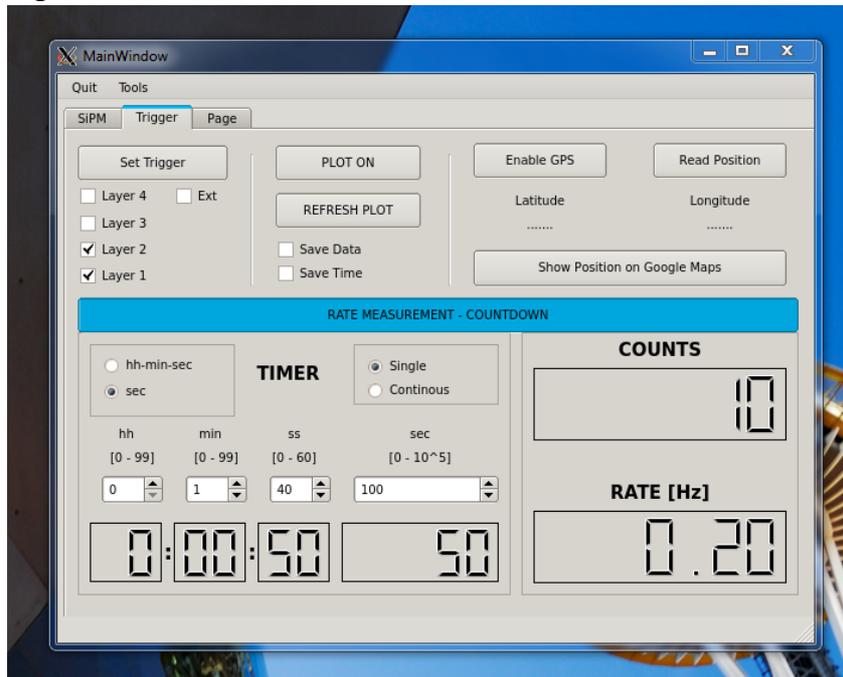
## 7. Impostazione delle soglie di rilevamento

Per poter contare il passaggio di raggi cosmici bisogna porre una soglia minima all’ampiezza dei segnali accettati in modo da rigettare quelli di piccola ampiezza dovuti al rumore elettrico intrinseco dei SiPM. Per fare questo scriviamo “20” nella finestra in basso a destra appena sopra il tasto “MONITOR (MANUAL)”. Premere il pulsante “SET” corrispondente e quindi “MONITOR”. La soglia di 20 mV verrà impostata per tutti i canali. Come prima è possibile poi modificare manualmente le singole soglie.

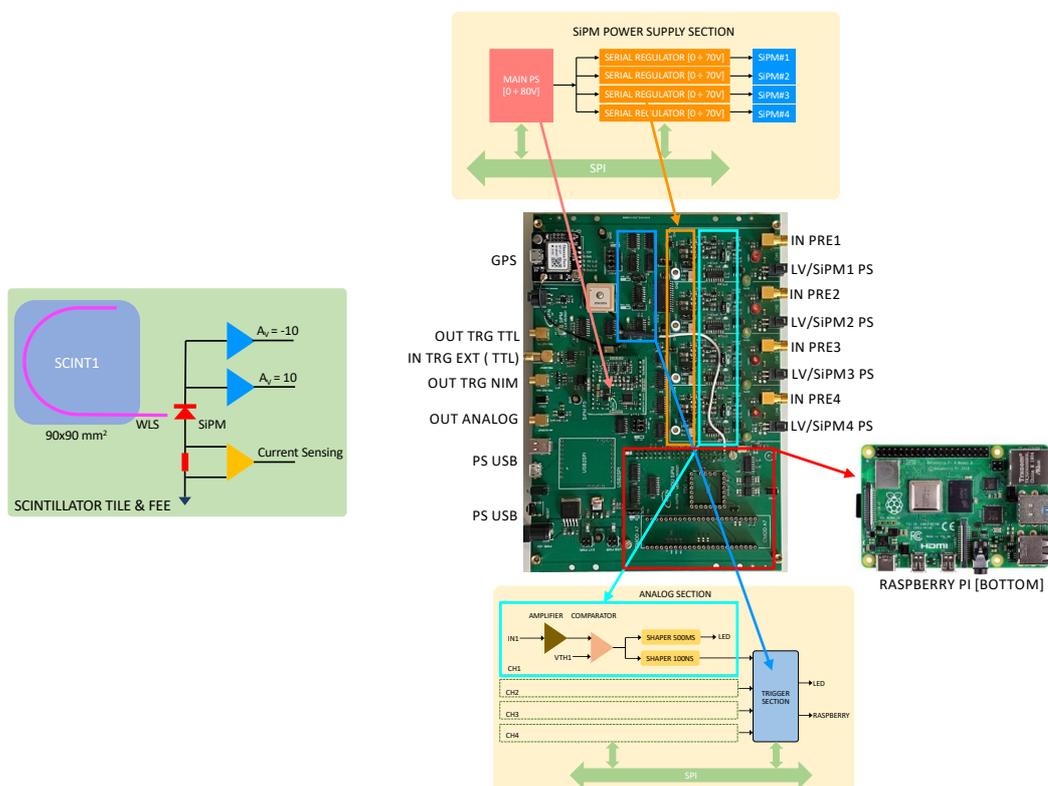
## 8. Acquisizione

Per contare ora le coincidenze in un intervallo di tempo dato, tornare sulla pagina “Trigger” impostare il numero di secondi nella casella “sec” per cui si vuole acquisire e poi premere

“RATE MEASUREMENT – COUNTDOWN”. Il rivelatore comincerà a contare le coincidenze e calcolerà la frequenza media con cui avvengono. Sull’oscilloscopio sarà possibile vedere i segnali dei due oscillatori in coincidenza.



## 9. Schema Scheda di Acquisizione

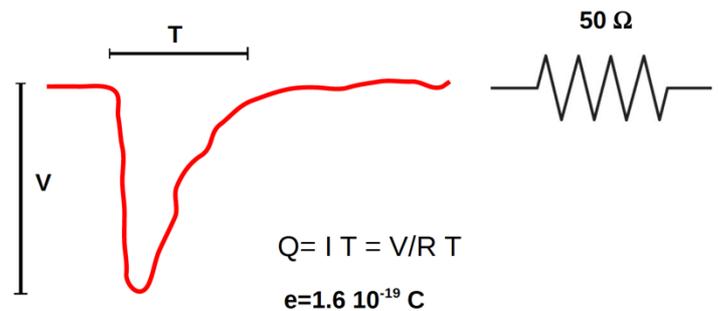


# Esperienze con i Raggi Cosmici

## 1. Stima guadagno SiPM

Un raggio cosmico quando passa in uno scintillatore di pochi mm di spessore genera circa 10,000 fotoni di scintillazioni. Questi sono raccolti da una fibra ottica con un'efficienza intorno al 1% e indirizzati verso il SiPM, un dispositivo a pixel ognuno dei quali genera un segnale elettrico ogni volta che colpito da un fotone. Il segnale elettrico in uscita è quindi proporzionale al numero di fotoni raccolti.

Osservando il segnale di un SiPM all'oscilloscopio ci accorgiamo che è costituito da bande che variano con altezza discreta che corrispondono a segnali costituiti da 1, 2 o più pixel colpiti da fotoni (quindi fotoni raccolti).



Misurando all'oscilloscopio l'ampiezza del più piccolo di questi segnali, corrispondente ad un solo pixel, possiamo stimare la carica elettrica del segnale totale e quindi il guadagno del dispositivo assumendo che parta da un singolo foto-elettrone. In figura abbiamo un segnale largo circa 20 ns e alto 10 mV (la scala verticale è di 5 mV a quadrato). Questo corrisponde ad una corrente di  $I = 10 \text{ mV} / 50 \Omega = 200 \mu\text{A}$ . La carica contenuta nel nostro segnale è quindi  $Q = I \cdot T = 200 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-9} = 4 \cdot 10^{-12} \text{ C} = 4 \text{ pC}$ .

Il numero di elettroni contenuti nel segnale è quindi:  $N_e = Q/e = 25,000,000$

Considerando il guadagno dell'elettronica di lettura pari a  $A_{ele} = 10$ , abbiamo un guadagno stimato del SiPM pari a  $A_{SiPM} = 2,500,000$

## 2. Misura del flusso di Raggi Cosmici

Stimiamo il flusso di raggi cosmici sovrapponendo due scintillatori e contando il numero di coincidenze in un tempo  $T = 100$ .

Risultato:

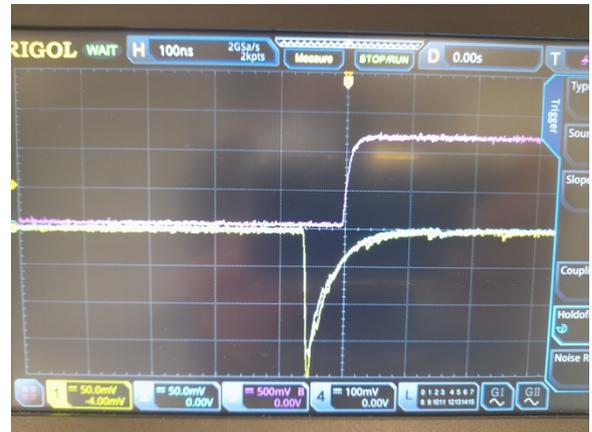
$T = 100 \text{ S}$

Conteggi 139

$$\text{Area}=9 \times 9=81 \text{cm}^2$$

$$\text{Flusso Raggi Cosmici} = 139 / (100 \text{s} \times 81 \text{cm}^2) \times 60 \text{s/min} = 1 / \text{min/cm}^2$$

Osserviamo inoltre un segnale tipico all'oscilloscopio. Dalla figura qui sotto vediamo che si hanno ampiezze tipiche di 100-200 mV. Ricordando che l'ampiezza dovuta ad un singolo fotone di scintillazione raccolto è di 10 mV, deduciamo che i segnali generati da Raggi Cosmici vengono raccolti mediamente 10 o 20 fotoni di scintillazione.



### 3. Osservazione di Sciami Cosmici

I Raggi Cosmici primari che urtano l'atmosfera terrestre generano degli sciami i cui componenti più stabili, muoni e neutrini arrivano al suolo. Qui noi osserviamo la componente carica, i muoni. Ci aspettiamo quindi di poter osservare il passaggio di raggi cosmici contemporaneamente in punti diversi.

Mettiamo quindi gli scintillatori sul tavolo uno accanto all'altro come in figura.



Osserviamo che si hanno poche coincidenze. Impostiamo un tempo abbastanza lungo di presa dati  $T=1000 \text{ s}$ .

Risultato:

$T=1000 \text{ s}$

$N=19$

Rate=19 mHz

Come facciamo a sapere che i conteggi non sono casuali?

Verifichiamo misurando la rate dei conteggi senza richiedere la coincidenza dei due segnali, cioè in singola-

*Misure di Singole stima rate accidentali:*

- Modificare trigger in singola. Dal Tab Trigger selezionare solo layer 1 o layer 2 e poi Set Trigger.
- T=100 s e "Start"
- Da oscilloscopio "counter" on e lasciare trigger su canale lemo trigger.

Misuro singole:

N1=63348

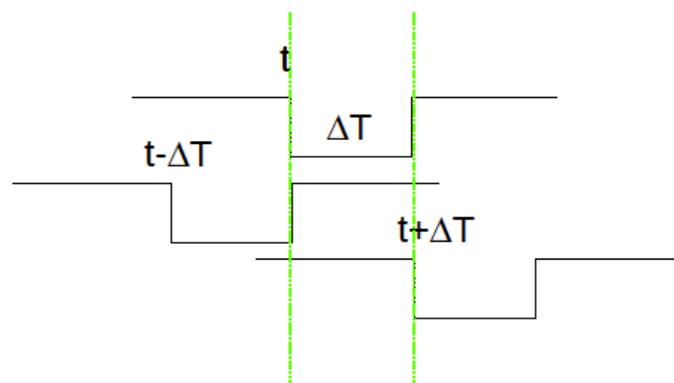
f1=633 Hz

si potrebbe anche alzare un minimo la soglia. Sarebbero da fare le misure in funzione della soglia.

N2=2677

Rate 26.77 Hz

Vediamo ora come calcolare il numero di coincidenze accidentali da questi valori, sapendo che l'elettronica ottiene le coincidenze formando dei segnali larghi  $\Delta T=100$  ns.

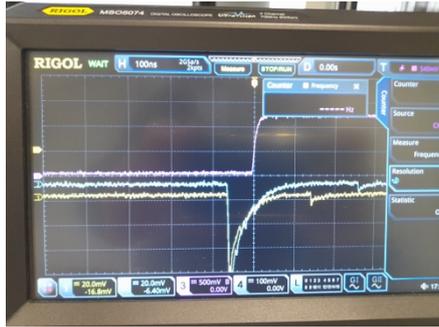


Dalla figura vediamo che due segnali larghi  $\Delta T$  si sovrappongono parzialmente se arrivano in una finestra temporale di durata  $2 \Delta T$ . La probabilità che un secondo segnale con rate  $f_2$  arrivi in coincidenza con il primo è  $P=2 f_2 \Delta T$ . La rate di accidentali è semplicemente questa probabilità moltiplicata per la rate  $f_1$  del primo segnale:

Rate accidentali =  $2 f_1 f_2 \Delta T$

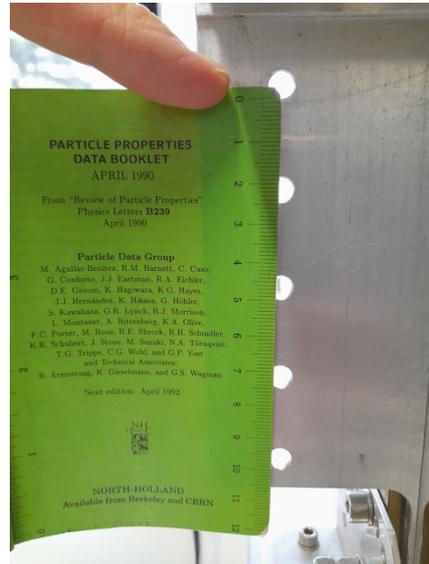
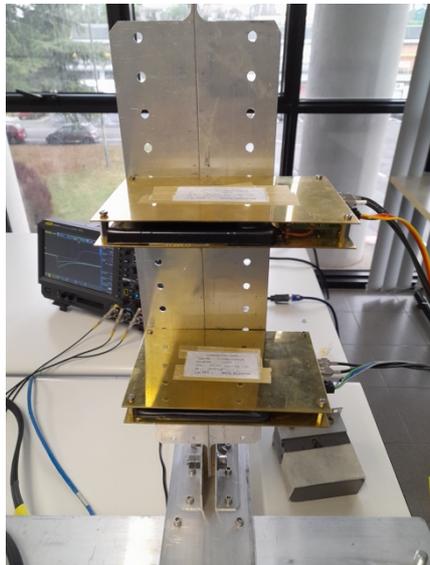
Nel nostro stimiamo  $R=2 \times 27 \text{ Hz} \times 633 \text{ Hz} \times 100 \text{ ns} = 3.4 \text{ mHz}$

Quindi in 1000 secondi di acquisizione ci aspettiamo mediamente solo 3.4 conteggi accidentali mentre ne abbiamo osservati 19! E' interessante osservare all'oscilloscopio il ritardo tra i due segnali degli scintillatori. Vedremo che i segnali si formeranno nello stesso istante, entro pochi ns, come nella figura a sinistra, mentre a volte saranno ritardati come nella figura a destra:



## 4. Radiazione Penetrante

Mostriamo ora che la maggior parte dei Raggi Cosmici osservati è costituita da una radiazione penetrante in grado di attraversare oggetti densi come il piombo.  
Per prima cosa montiamo gli scintillatori sul trespolo ad una distanza di 15 cm come in figura (distanza tra i fori 25 mm).



Contiamo le coincidenze per  $T=1000$  s (ma anche meno).

Risultato:

$T=1000$  s

$N=359$

Rate=0.359 Hz

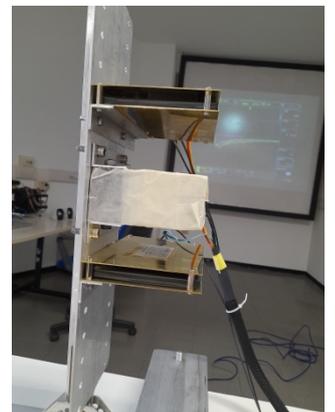
Inseriamo ora una mattonella di piombo di spessore 5 cm come nella figura accanto, e ripetiamo i conteggi delle coincidenze.

Risultato:

$T=1000$  s

$N=288$

Rate=0.288



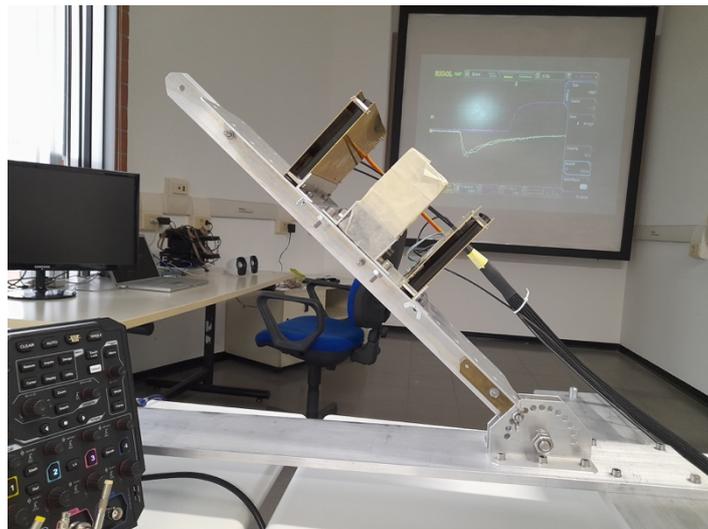
Osserviamo che il numero di coincidenze si è ridotto da 359 a 288. Anche considerando le fluttuazioni statistiche  $\delta N$  sui conteggi date dalla relazione:

$$\delta N = \sqrt{N}$$

Osserviamo uno scostamento di 71 conteggi a fronte di una fluttuazione attesa di 19 conteggi. Deduciamo che circa l'80% dei Raggi Cosmici osservati è in grado di attraversare un panetto di piombo di spessore 5 cm! La restante componente è nota come componente "soft" (o "molla") composta da elettroni di bassa energia che possono essere generati dai Raggi Cosmici che attraversano il materiale della stanza-laboratorio. Questo ci suggerisce che dovremmo ripetere l'esperienza degli siamo ponendo del piombo a schermaggio degli scintillatori.

## 5. Dipendenza dall'angolo del flusso di raggi cosmici e stima della vita media del muone

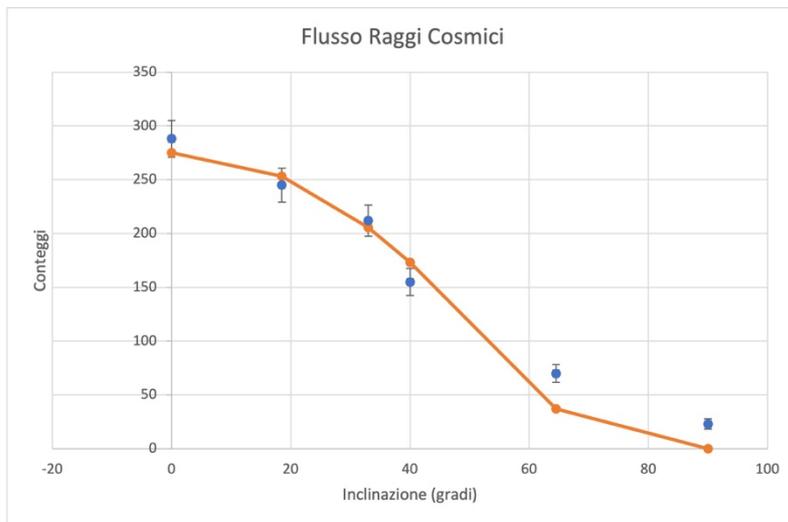
A questo punto, tenendo la schermatura in piombo possiamo ripetere la misura dei flussi di raggi cosmici a diverse inclinazioni del telescopio.



Ripetendo i conteggi sempre per  $T=1000$  s (eventualmente ridurre il numero di conteggi o di punti), otteniamo:

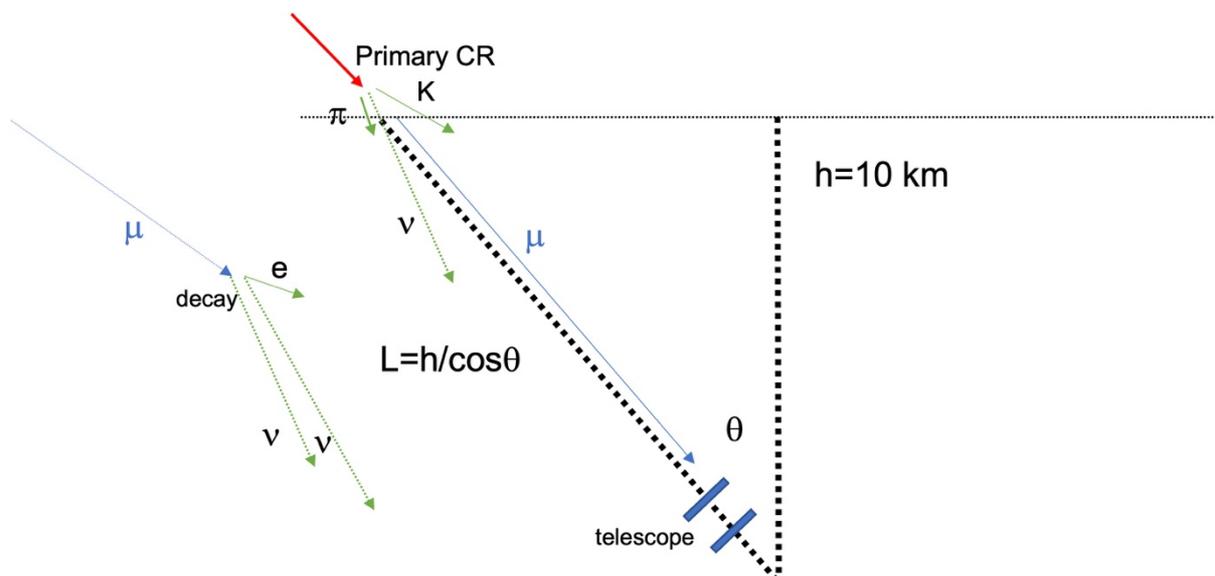
Angolo rispetto alla verticale (gradi)	Conteggi	Errore
0	288	17
18,5	245	16
33	212	15
40	155	12
64,5	70	8
90	23	5

I dati sono riportati nella seguente misura a cui abbiamo sovrapposto l'andamento teorico discusso di seguito.



Andamento atteso del flusso di Raggi Cosmici con l'inclinazione e stima della vita media del muone

I muoni ( $\mu$ ) sono prodotti nelle collisioni dei Raggi Cosmici primari con la nostra atmosfera ad una altezza dell'ordine di  $h=10$  Km. Durante il loro tragitto verso terra possono decadere in un elettrone e due neutrini e non essere quindi misurati nel nostro telescopio. Il loro decadimento avviene secondo la legge esponenziale  $\exp(-L/\lambda)$  dove  $L$  è la distanza percorsa e  $\lambda$  il cammino medio. È chiaro quindi che più è inclinata la traiettoria del muone maggiore sarà il cammino che dovrà percorrere e maggiore la probabilità di scomparire in un decadimento.



Ne segue che in funzione dell'angolo di inclinazione  $\theta$  ci aspettiamo di misurare un andamento secondo la seguente funzione:

$$N(x) = N_0 e^{-\frac{h}{c\gamma\tau \cos\theta}}$$

dove abbiamo sostituito  $L=h/\cos\theta$  e  $\lambda=c\gamma\tau$  dove  $c=3\times 10^8$  m/s è la velocità della luce,  $\gamma=10$  è il termine di dilatazione temporale relativistica dei muoni nei Raggi Cosmici che hanno energie di circa 1-2 GeV, e  $\tau=2.2\mu\text{s}$  è la vita media del muone.  $N_0$  è stato adattato per riprodurre i dati ed è legato al flusso di Raggi Cosmici primari ma anche all'accettazione del nostro telescopio e altro (energia primario etc.).

Sostituendo questi valori si ha la curva nella figura con la distribuzione sperimentale. È possibile però usare i dati sperimentali e questa funzione per determinare  $\tau$  ad esempio misurando il flusso a 0 e  $\theta$  (ad esempio 45 gradi) e usando la relazione:

$$\tau = \frac{h}{c\gamma} \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) / \ln(N(0)/N(\theta))$$

### La Costante di Fermi

Il processo di decadimento  $\mu = e\bar{\nu}$  in cui il muone si trasforma in un elettrone e due neutrini è dovuto alle *interazioni deboli* una delle forze fondamentali presenti in natura. L'intensità di questa forza è data dalla costante di Fermi,  $G_F$ , così come la costante di Newton  $G_N$  indica l'intensità della forza gravitazionale. Esperimenti di alta precisione per la misura della vita media del muone permettono oggi di determinare la costante di Fermi con alta precisione utilizzando la seguente formula, qui in forma approssimata:

$$\frac{\hbar}{\tau} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3}$$

dove  $\hbar = 6.582 \times 10^{-22} \text{ MeV s}$  e  $m_\mu = 105.66 \text{ MeV}$ .

La formula completa, contenente alcune correzioni teoriche, si trova trovata sul Particle Data Group (<https://pdg.lbl.gov>) di cui riportiamo un estratto:

#### 10.2.1 The Fermi constant

The Fermi constant,  $G_F = 1.1663787(6) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ , is derived from the  $\mu$  lifetime formula<sup>5</sup>,

$$\frac{\hbar}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} F(\rho) \left[ 1 + H_1(\rho) \frac{\hat{\alpha}(m_\mu)}{\pi} + H_2(\rho) \frac{\hat{\alpha}^2(m_\mu)}{\pi^2} \right], \quad (10.7)$$

where  $\rho = m_e^2/m_\mu^2$ , and where

$$F(\rho) = 1 - 8\rho + 8\rho^3 - \rho^4 - 12\rho^2 \ln \rho = 0.99981295, \quad (10.8a)$$

$$\begin{aligned} H_1(\rho) &= \frac{25}{8} - \frac{\pi^2}{2} - (9 + 4\pi^2 + 12 \ln \rho) \rho + 16\pi^2 \rho^{3/2} + \mathcal{O}(\rho^2) \\ &= -1.80793, \end{aligned} \quad (10.8b)$$

$$\begin{aligned} H_2(\rho) &= \frac{156815}{5184} - \frac{518}{81} \pi^2 - \frac{895}{36} \zeta(3) + \frac{67}{720} \pi^4 + \frac{53}{6} \pi^2 \ln 2 \\ &\quad - (0.042 \pm 0.002)_{\text{had}} - \frac{5}{4} \pi^2 \sqrt{\rho} + \mathcal{O}(\rho) = 6.64, \end{aligned} \quad (10.8c)$$

$$\hat{\alpha}(m_\mu)^{-1} = \alpha^{-1} + \frac{1}{3\pi} \ln \rho + \mathcal{O}(\alpha) = 135.901. \quad (10.8d)$$

