



Laboratorio di Fisica delle Interazioni Fondamentali  
Università di Pisa

**CARATTERIZZAZIONE DEL  
DECADIMENTO DEL MUUONE**

## Introduzione

L'esperienza consiste nello studio del decadimento dei muoni cosmici arrestati in materiali differenti. A causa della loro interazione con i nuclei presenti nel materiale, i muoni negativi sono soggetti a un decadimento più rapido dei muoni positivi. Questo falsa la misura di vita media se non si possono separare le due specie di carica. Tuttavia, utilizzando materiali in cui le due vite medie sono sufficientemente diverse è possibile misurarle separatamente, recuperando così sia il valore dalla vita media del muone libero (dai muoni positivi), che quello del muone legato a un nucleo atomico (dai muoni negativi), che l'abbondanza relativa delle due cariche. Inoltre, rivelando indipendentemente i decadimenti in cui l'elettrone è emesso verso l'alto e quelli verso il basso, è possibile osservare una eventuale asimmetria della direzione del decadimento rispetto alla direzione di volo iniziale.

(vuoto)	$2.197 \mu s$
C	$2.025 \pm 0.004 \mu s$
Al	$0.88 \pm 0.01 \mu s$
Fe	$0.201 \pm 0.004 \mu s$
Pb	$0.0749 \pm 0.0004 \mu s$

Tabella 1: Vita media del  $\mu^-$  in presenza di alcuni nuclei atomici comuni.

## Apparato sperimentale

- Telescopio per raggi cosmici costituito da alcune lastre piane di scintillatore plastico di spessore circa 1 cm, con guide di luce in plastica e fotomoltiplicatori, separati da intercapedini in cui si possono posizionare lastre di materiale di dimensioni  $40 \times 50$  cm.
- Lastre metalliche di diversi materiali (piombo, alluminio, ferro), tra cui una di ferro magnetizzato.
- Vari moduli logici NIM (coincidenze, timing unit, convertitore TTL/NIM/TTL, linee di ritardo, contatori).
- 2 Alimentatori HV CAEN DT3355E a 4 canali controllabili da terminale (scaricare il manuale e le istruzioni di uso da **e-learning** documentazione tecnica).
- Scheda di acquisizione dati basata su FPGA (DE0-Nano), programmata per registrare il tempo di arrivo di segnali digitali parallelamente su 8 canali. Si faccia riferimento alla documentazione fornita a parte per l'uso della scheda. (**Attenzione:** la scheda richiede inputs compresi tra 0 e 3.3V - è necessaria ad esempio una conversione di standard elettrici per collegarla ai moduli NIM).

- PC collegato alla scheda di acquisizione DE0-Nano via interfaccia USB, con un programma che consente di salvare i dati su un file in formato ASCII per la successiva analisi *off-line* con software di propria scelta.

## Principali obiettivi da raggiungere

1. Misurare la vita media del muone libero, con la massima precisione raggiungibile con l'apparato a disposizione.
2. Misurare la vita media dei muoni legati per almeno due dei materiali a disposizione, con la massima precisione raggiungibile con l'apparato a disposizione.
3. Misurare il rapporto di abbondanza delle due cariche  $R_+ = N(\mu^+)/N(\mu^-)$  nella popolazione dei muoni cosmici che si arrestano nel vostro apparato.
4. Misurare l'asimmetria alto/basso della direzione di emissione dell'elettrone di decadimento. L'osservazione di una asimmetria non nulla costituisce una prova sperimentale di violazione della parità nel decadimento del muone.

## Procedure suggerite

0. Informatevi dal tecnico di laboratorio delle procedure corrette da seguire per operare in sicurezza sul vostro apparato, e seguitene scrupolosamente le indicazioni.
1. Iniziate con l'apparato privo di strati di assorbitori, e alimentate correttamente tutti i fototubì. Per i primi steps avrete bisogno come strumentazione soltanto di discriminatori, contatori, e qualche coincidenza. Gli alimentatori HV CAEN DT3355E sono controllabili da terminale, eseguendo il comando di linea **caengeco2020** e quindi caricando da menu con il comando **Load** il file da selezionare **Setting-2ch.csc** che configura due pannelli di controllo rispettivamente per i canali PMT01-04 e PMT05-07.
2. Trovate un valido punto di lavoro per ciascuno dei rivelatori a scintillatore che userete, adoperando ogni volta una coppia di essi come *trigger* di riferimento (coincidenze in tripla). Stimatene almeno grossolanamente l'efficienza al fine di verificarne il funzionamento corretto.
3. Una volta fissati i valori di alimentazione e le soglie di discriminazione dei rivelatori, effettuate la messa in tempo degli stessi, osservando all'oscilloscopio il ritardo relativo dei loro segnali e correggendolo con l'inserimento di opportuni moduli di ritardo. Assicuratevi di riuscire a vedere le coincidenze di segnali che attraversano tutti i piani del rivelatore, e annotatene il *rate*. Assicuratevi che sia in accordo con le vostre aspettative prima di procedere oltre.
4. Avendo regolato l'apparato per rivelare correttamente i muoni che lo attraversano completamente, realizzate ora un sistema per arrestarli al suo interno e quindi rivelarne il decadimento. Inserite un certo spessore di materiale frenante in una delle intercapedini disponibili tra i rivelatori. Realizzate quindi un trigger per gli eventi in cui un muone si è arrestato in tale strato (segnaletica di START), con opportune coincidenze di segnali dei rivelatori posti al di sopra del materiale, e di un segnale di VETO di un rivelatore posto al di sotto e di durata opportuna. **Verificate che il *rate* sia compatibile con le aspettative.** Già a questo punto potrebbe essere possibile osservare direttamente qualche decadimento di muoni arrestatisi nel materiale, semplicemente visualizzando all'oscilloscopio i segnali dei due rivelatori sopra/sotto di esso, con il trigger esterno fornito dal segnale di START.
5. A questo punto (o meglio in parallelo ai punti precedenti se vi è possibile), familiarizzate con il modulo FPGA DE0-Nano e il relativo software di acquisizione dati su file. **Prestate innanzitutto attenzione alla compatibilità elettrica dei segnali di ingresso.** Tenete

presente inoltre il fatto che il modulo ha una banda di acquisizione limitata, e può malfunzionare se riceve una frequenza di segnali di input più elevata di pochi Hertz. Verificatene il funzionamento con dei segnali di calibrazione generati servendovi di moduli disponibili. Controllate la calibrazione e l'offset della scala dei tempi delle misure.

6. Procedete ora a realizzare il sistema di acquisizione dei dati usando il modulo DE0-Nano. Per fare questo potrete in linea di principio semplicemente inserire negli ingressi il segnale di START e i due scintillatori sopra/sotto e procedere alla presa dati su file (oppure addirittura inserire i segnali di tutti i rivelatori direttamente nel modulo, rimandando ogni selezione alla analisi *off-line* dei dati). Tuttavia, oltre a considerazioni di praticità sull'evitare l'acquisizione di troppi dati non necessari, occorre considerare che come tutti i sistemi di acquisizione dati, il vostro modulo ha una banda massima di acquisizione (che è piuttosto limitata), oltre la quale non è in grado di funzionare correttamente. È perciò opportuno realizzare anche un segnale di GATE, per definire una finestra temporale limitata a seguito dell'arrivo di un segnale di START, in cui è interessante raccogliere dati. I segnali dei rivelatori del decadimento (segnali STOP) possono così essere messi in coincidenza con il GATE, limitandone la frequenza di acquisizione. Fate attenzione alla giusta relazione temporale tra l'inizio del GATE e lo START (ci sono ripartenze?). *Suggerimento:* è inoltre una buona idea mettere in funzione dei sistemi di monitoraggio per tenere d'occhio il regolare funzionamento dell'apparato durante la presa dati, specie se lunga, per scongiurare possibili spiacevoli sorprese alla fine. Il semplice display del conteggio di impulsi degli START e degli STOP può essere molto utile.
7. Raccogliete su file un primo campione di dati sufficiente a verificare la presenza del segnale che vi aspettate, con la vita media che vi aspettate, e fate una prima valutazione della potenzialità del vostro apparato. Prestate particolare attenzione alla possibile presenza di *afterpulses*: falsi doppi segnali che a volte possono essere generati da un PMT alcuni  $\mu s$  dopo l'arrivo di un segnale genuino, e che potrebbero alterare i vostri risultati. Se necessario, utilizzate l'AND di due PMT per eliminarli.
8. Ai fini di una buona misura è importante massimizzare il numero di decadimenti validamente ricostruiti dal vostro apparato. A parte l'efficienza dei rivelatori, il fattore più importante è lo spessore del materiale frenante. Potrebbe sembrare che sia vantaggioso usarne il più possibile, tuttavia va considerata anche la crescente probabilità che l'elettrone di decadimento venga frenato e assorbito prima di riuscire a raggiungere i rivelatori. Procedere per tentativi può far perdere molto tempo, per cui può essere opportuno realizzare preventivamente una stima teorica dello spessore ideale, e utilizzarla nelle misure successive.
9. Sfruttate la possibilità di utilizzare più strati, di materiali uguali o diversi, posizionati in diverse intercapedini del telescopio, in modo da poter acquisire simultaneamente più sets di dati. Quando siete sicuri della configurazione, raccogliete sistematicamente dati per lunghi periodi.
10. Analizzate i dati raccolti con un programma di fit, e determinate le vita medie sia dei muoni positivi che di quelli negativi. Considerate il modo migliore di realizzare il fit e di tenere conto della possibile presenza di eventi di fondo di vario genere. Quali dei materiali a disposizione sono più utili agli scopi delle vostre misure? Ragionate sugli effetti che possono indurre errori sistematici, il loro impatto sul risultato, e il modo per minimizzarne l'effetto, e discutete le vostre conclusioni nella relazione. Discutete anche quali pensate siano i fattori fisici importanti che determinano le differenti vite medie dei muoni negativi legati a differenti tipi di nuclei atomici.
11. Analizzate ora i dati raccolti ai fini di determinare l'asimmetria di decadimento sopra/sotto. Utilizzate a questo fino anche la lastra magnetizzata, e valutate la differenza che questa introduce rispetto ad una lastra normale. Sarà necessario anche determinare con una certa precisione le efficienze dei vari strati di rivelatore. Considerate il modo migliore per farlo,

riflettendo in particolare sui possibili vantaggi offerti dalla spaziatura regolare degli scintillatori, ai fini di permettere il calcolo di accettanze senza la necessita' di utilizzare un programma di Monte Carlo.

12. Determinate ora dai vostri dati la asimmetria sopra/sotto del decadimento dei muoni arrestatevi nell'apparato, con la maggiore precisione possibile. Si discuta se l'asimmetria dipende dal materiale e/o dalla carica del muone, e il suo significato fisico.
13. Determinate infine il rapporto tra le abbondanze dei muoni positivi e negativi che si sono arrestati nel vostro apparato.

12/04/22

Abbiamo visto come funziona l'apparato a grandi linee e ci accingiamo a partire con il punto 2, cioè trovare i punti di lavoro



Vogliamo dei punti di lavoro ottimale

Il segnale raw a circa 1700 V è largo tra 10 e 20 ns (scintillatore plastico più veloce ma meno accurato in energia) e ampio tra 500 e 1000 mV.

Per prima cosa aggiungiamo con le coincidenze e i discriminatori per vedere se il mondo ha senso.

Vogliamo vedere il comportamento dell'efficienza con la tensione di alimentazione, così che si possa scegliere una tensione appena dopo un'eventuale salita brusca di epsilon. partiamo con pmt2 paninato da pmt1 e pmt3, entrambi a 1800V

1600V 53/118  
1650V 61/72  
1700V 92/106  
1750V 102/107  
1800V 81/91  
1850V 93/97  
1900V 110/122

Il primo buono sembra 1750 V, riprovando 100/118 e 82/97: nope  
Anologo per 1800V, in cui inizia ad andare sui 0.9

Pmt1 non sale sopra 0.4  
Pmt2 è a circa 0.9  
Pmt3 già a 1800 è quasi a 1, sopra il 0.9  
Pmt4 è intorno 0.75  
†

L'efficienza dipende anche molto da QUALI pmt si sceglie di triggerare per misurarla. È **IMPORTANTESSIMO** tenerne conto al fine di valutare le efficienze.

Per esempio il pmt4 va da tipo 0.75 a oltre 0.9. Il fattore geometrico influenza più di quanto uno pensi

Vogliamo ora vedere un cosmico: mettiamo la coincidenza tra 5 dei rivelatori (da 2 a 6) e guardiamo cosa esce.

Piccolo problema eravamo drogati chi si ricorda cosa e come è successo

13/04/2022

Abbiamo aggiornato con il discriminatore a 8 canali e scoperto che la thr che ci dice è moltiplicata per 10

Abbiamo anche verificato che il linear fan out attenua un pochino **once** il segnale così che non venga attenuato per ogni volta che lo splitti, cosa che abbiamo visto

Infine abbiamo verificato che i ritardi riportati sul rack tra i canali provenienti dall'altra stanza **non sono veri**, bisognerà rimisurarli per bene e sincronizzarli

Incontro 26/

27/04/2022

Misuriamo le efficienze dei pmt con i due adiacenti a panino, variando la tensione di alimentazione e vedendo in quale regione raggiunge il massimo. Questa cosa è fatta grossolanamente dato che lo scopo è più che altro quello di avere una stima **veloce** seppur grezza

```
pmt2: 1930 V con e=0.9  
pmt3: 1930 V con e=0.6  
pmt4: 1930 V con e=0.75  
pmt5: 1880 V con e=0.9  
Pmt6: 1900 V con e=0.9
```

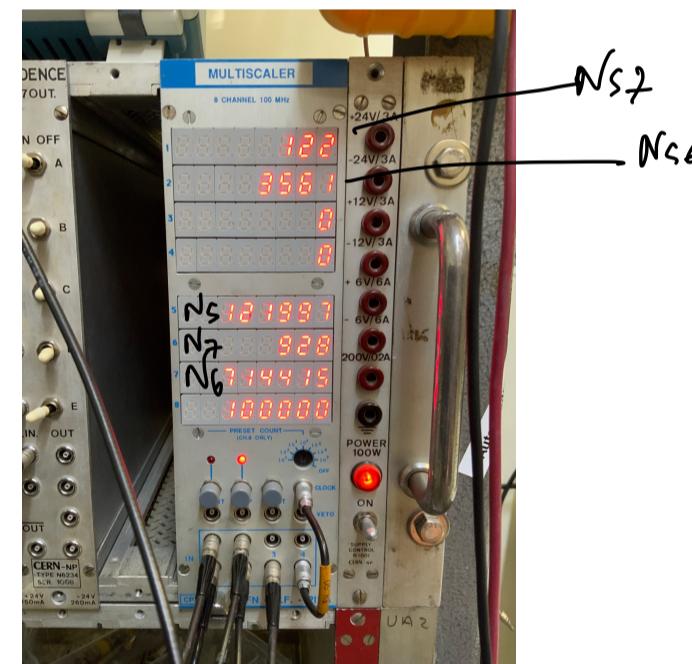
Per calibrare il pmt6 abbiamo fatto uso del 5 e del 7 mobile. Il 7 ha area di circa 4x4 cm<sup>2</sup> invece dei 40x48 cm<sup>2</sup> dei più grandi. Quindi ci aspetteremmo che abbia 1/120 del segnale, se non di meno per motivi di geometria peggiore o uguale. Invece si vede che ha circa 1/20 degli eventi (ca 100 invece di ca 2000, sempre su 100s di clock). Come si spiega?

28/04/2022

Usiamo dei sistemi di delay per capire quante delle coincidenze tra 7 e 5 sono casuali. Per questo scopo usiamo in cascata dei delay modules di ca 60 e ca 100 ns (la durata dei segnali discriminati è impostata su ca 50 ns). Contiamo quindi le coincidenze in questa disposizione sempre su 100 secondi. Le coincidenze sono 17 su 100s.

Se si leva il delay si trova invece  
N7=889 N5=92827 N57=105

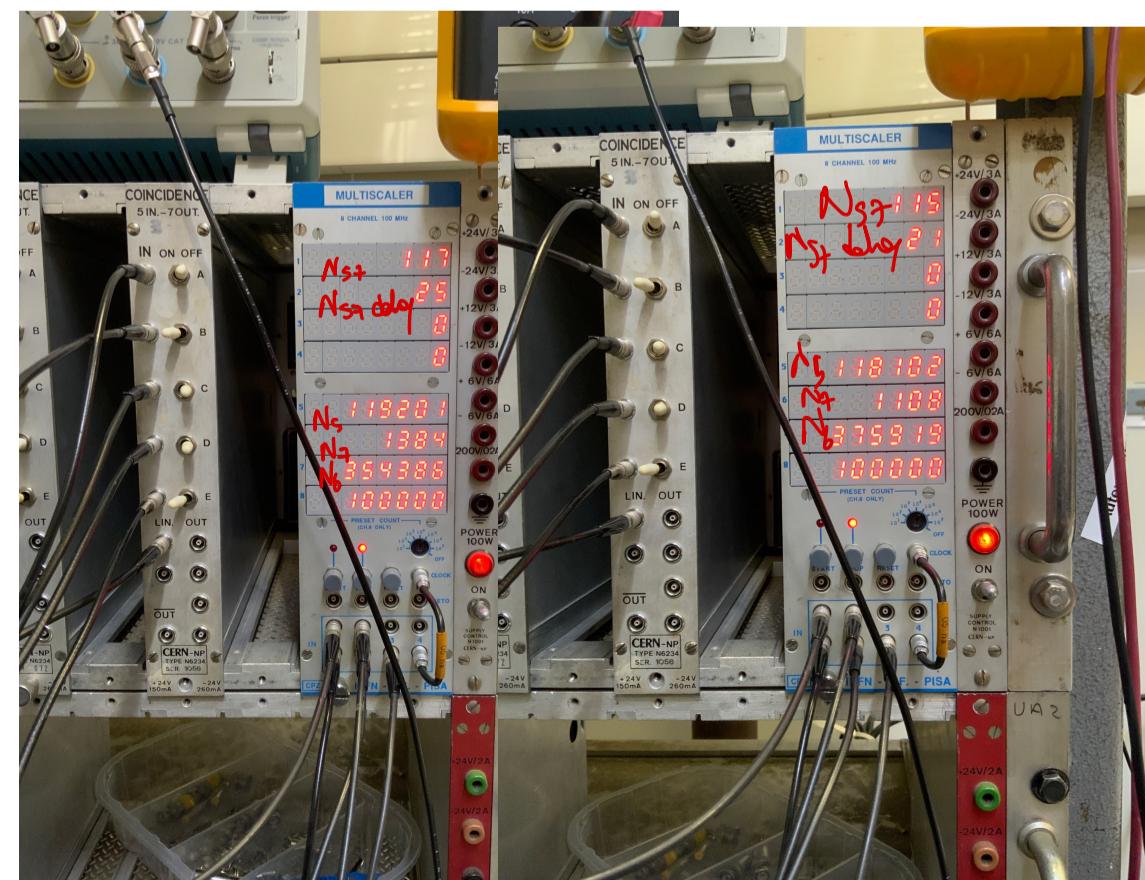
Se si include anche il 6



si può anche mettere il pmt7 sopra all'angolino al bordo dei pmt, non sopra il loro centro:

A sinistra è sul bordo, a destra è nel centro.

Le coincidenze casuali e totali vengono **compatibili tra loro indipendentemente da dove si trova il pmt7**. Ciò non ci torna perché ci aspetteremmo che al bordo, pur guadagnando un pochino di angolo massimo in una direzione, si sacrificia tantissimo del segnale (in teoria più o meno 3/4), la cui maggior parte arriva ad angoli piccoli rispetto alla verticale. Abbiamo ipotizzato che fosse perché la maggior parte dei raggi passa



...all'interno dell'ombra proiettata dal pmt7 sul 5. Così sarebbe atteso che anche le coincidenze totali siano uguali al bordo, dato che i raggi non lo "sentirebbero". Però facendo i conti con distribuzione  $\cos^2$  ci torna che sono solo circa 1/5 i raggi che rimangono all'interno dell'ombra del 7. **Quindi il mistero rimane.**

Un altro mistero è perché le coincidenze casuali tra 7 e 5 ottenute con delay time **sono due ordini di grandezza maggiori** (20 vs 0.1) di quanto attese con  $f5f7\tau_{\Delta t}$ . Questo potrebbe essere dovuto a eventuali ripartenze del discriminatore. Se così fosse dovrebbe essere possibile testarlo con un delay maggiore.

Siccome il pmt1 è un po distante dal più vicino pmt2, se lo paninassimo con pmt7 che già è molto piccolo le coincidenze tra 7 e 2 sarebbero rarissime: invece quindi di trovare il punto di lavoro di pmt1 con 7 e 2 (analogamente a quanto fatto per il pmt6) usiamo 2 e 3. Questo farà sì che il valore per efficienza dell'1 risulterà **molto sottostimato**, perché non è paninato e oltretutto abbastanza lontano da 2 e 3, però a noi **in questo momento non interessa tanto efficienza quanto dove è il suo massimo, cioè settare il punto di lavoro.**

Interessantemente da non drogati non abbiamo fatto una cosa che invece da drogati avevamo fatto correttamente, cioè guardare uno spettro più **ampio** di tensioni di alimentazione (non solo da 1800 V in su) e prendere come **alimentazione la tensione di ginocchio appena finita la salita ripida**. Invece noi guardavamo "zoomata" solo la regione di plateau. Il motivo per il quale non conviene prendere roba troppo interna al plateau è che si guadagna di poco in efficienza (rispetto al ginocchio) e in compenso si guadagna tanto rumore. **Dobbiamo ancora meditare su questa cosa, cioè su rigorosamente qual è l'effetto di questo rumore sull'efficienza, e la relazione tra efficienza e rapporto segnale rumore...**

Perciò siamo tornati indietro e abbiamo misurato le efficienze dei pmt già viste, prendendo anche lo spettro a tensioni più basse così da vedere il ginocchio chiaramente. In realtà questo **non è totalmente corretto** perché abbiamo messo sullo stesso grafico quindi dati presi in giorni diversi e con alimentazioni dei pmt che paninavano diverse alla fine a causa di tutti i cambiamenti fatti nel frattempo.

Infatti abbiamo dovuto riprendere per i pmt praticamente **tutte** le efficienze perché sennò non vengono coerenti i profili di efficienza.

All'incontro di martedì vogliamo parlare di:

- Incoerenze di quanto segnale si osserva al bordo col pmt7 rispetto al centro
- Incoerenze tra casuali attesi e quanto osservato introducendo il delay
- Spettri (quelli che abbiamo preso almeno) delle efficienza (**chiedere del perché ginocchio**)
- Limiti stimati per intervalli utili per coincidenza temporale

Incontro 03/05/2022

Velociiii

03/05/2022

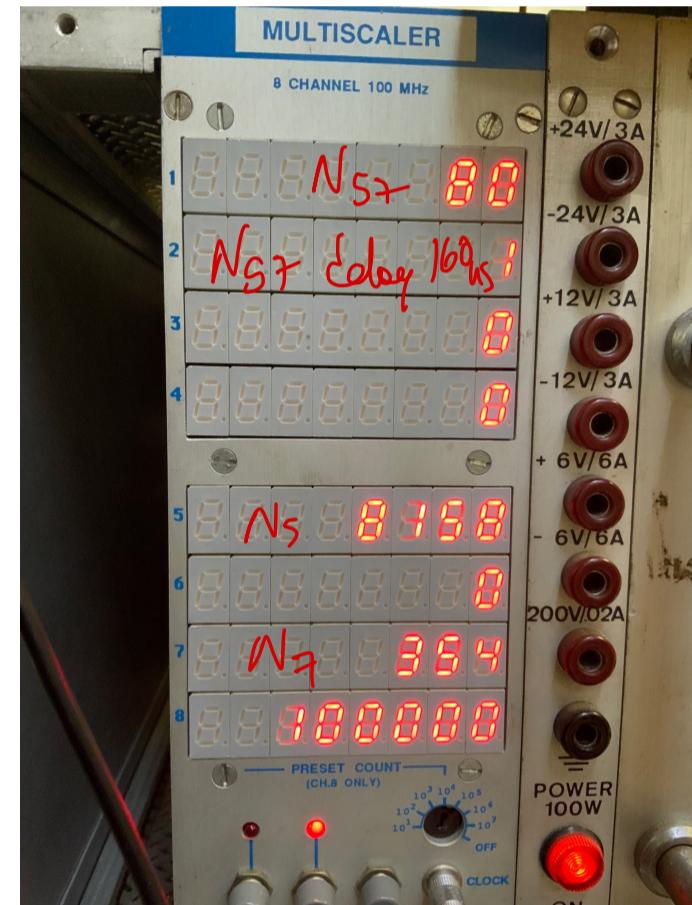
Prendiamo le efficienze di pmt5 e pmt6 facendo l'intero spettro. Prendiamo anche quella del 7 mettendolo tra pmt6 e pmt5. Per quanto riguarda i risultati sono dettagliati nel codice e Matteo ha fatto le foto del multiscaler a ogni punto con il suo cellulare

Approfittiamo dell'occasione per verificare se l'efficienza dipende dalle tensioni dei paninanti, perché Punzi aveva detto che ciò non ha senso. Invece abbiamo provato a diminuire le tensioni dei paninanti e l'efficienza **aumenta** e ciò **ha senso invece** perché diminuisce il rumore ma quest'ultimo è molto più abbondante, **anche in proporzione**, al denominatore rispetto al numeratore. È quindi normale che aumenti l'efficienza. Comunque a noi interessa il ginocchio quindi chissene.

Vogliamo anche indagare sto fatto delle coincidenze delayed molto maggiori di quelle attese. Se fosse dovuto a ripartenze questo spiegherebbe anche perché quando ci sono pochi conteggi e l'efficienza è molto vicina a 1 talvolta le triple sono più delle doppie! Per fare ciò proviamo a sfasare i segnali con un timer di molto di più (1 us) e vediamo se l'effetto rimane.

**Oggi è tornato sensato il risultato!** In foto c'è il risultato di un delay di 160 ns circa **come l'altra volta** e in effetti ora viene qualcosa di sensato la coincidenza con il delay. Forse erano dei cavi collegati male o forse dipende in qualche maniera dall'aver cambiato nel frattempo le tensioni di alimentazione. La cosa strana è che l'altra volta davvero era venuto circa 20 in molteplici occasioni...

Punt 7 sopra  
il 6 envelope  
m'altro volte



Verifichiamo ora che i segnali dei vari pmt siano in tempo fra loro. Li compariamo tutti con pmt2, trovando che tutti i segnali sono entro 5 ns da pmt2, eccetto alcuni rari eventi che comunque erano ca a 10 ns. Quindi sono assolutamente in tempo ai fini dei nostri scopi.

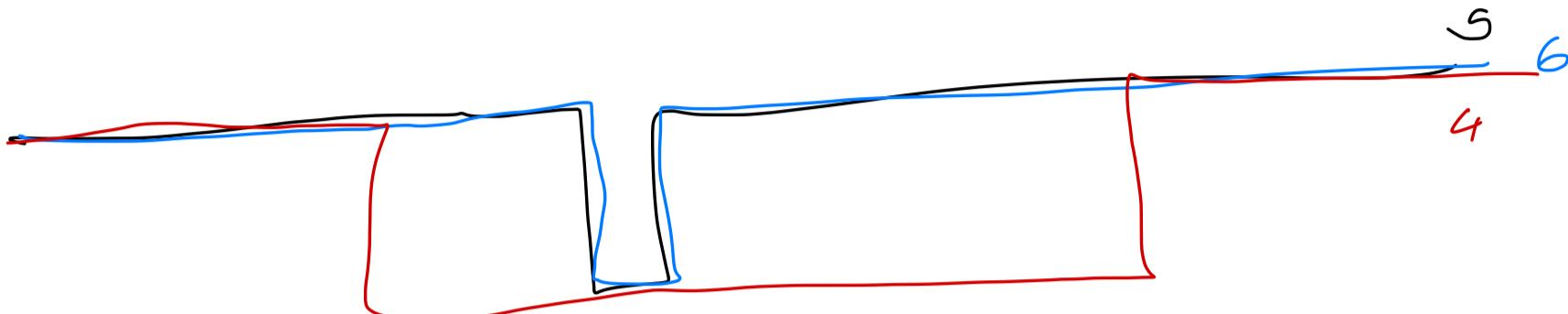
Qui sono dovuto andare via un'ora prima...

04/05/2022

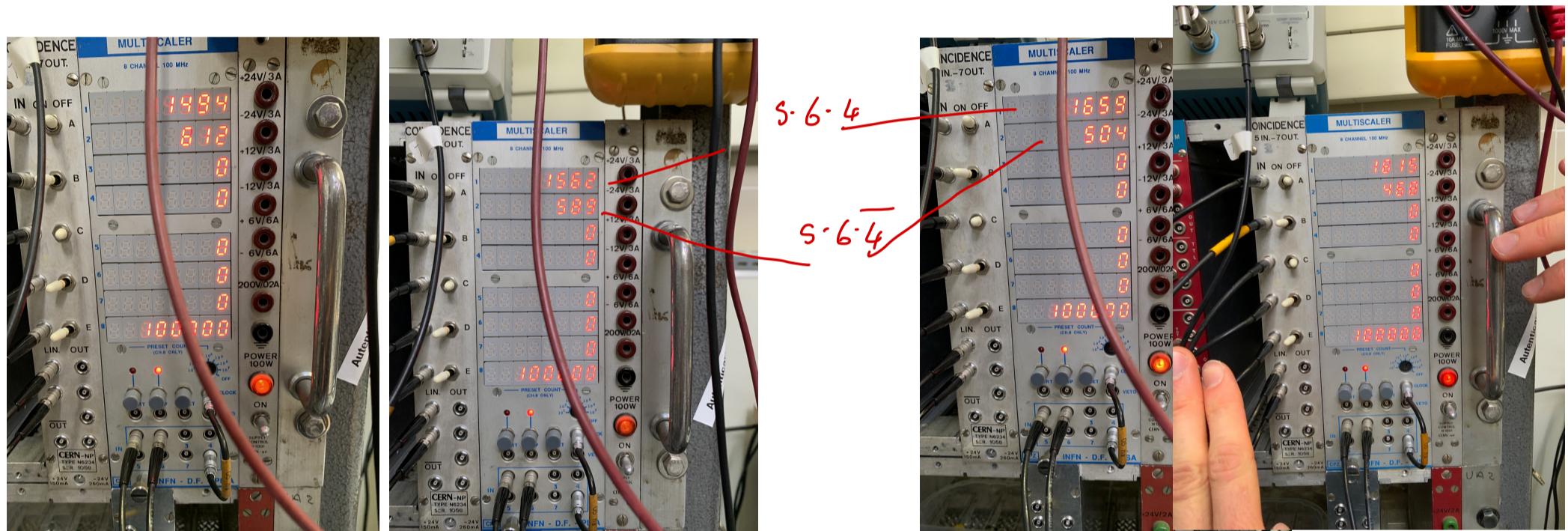
Abbiamo visto che l'unità di dual timer ha la funzione di inversione del segnale già integrata, ed è utile da usare perché il timer ci serve per allargare il segnale di voto rispetto all'altro segnale

Abbiamo iniziato a fare pratica con la scheda.

Nel frattempo Abbiamo messo del Fe tra pmt 5 e pmt4 e abbiamo contato gli eventi 5&6&not4 e 5&6&4, aggiustando i ritardi e le durate così che 5 e 6 fossero in coincidenza temporale e entrambi all'interno del segnale di 4, dato che dovendo fare da VETO deve contenerli



Abbiamo fatto questa cosa con e senza il Fe tra pmt5 e pmt4 trovando



Con Fe

Senza Fe

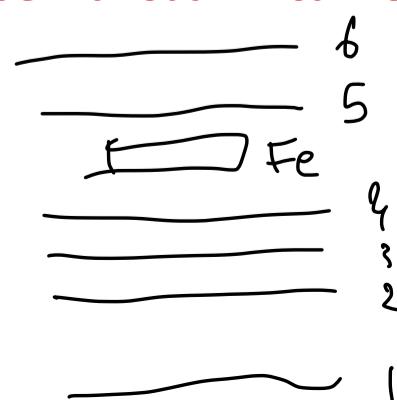
A questo punto si usa l'efficienza deducibile dal senza Fe per valutare quanti in media dei casi con 4 negato quando c'è Fe sono dovuti al muone che si ferma nel Fe.

Tutto questo però a noi non interessa più di tanto perché noi vogliamo vedere le **differenze temporali tra quando passa il muone (START) e quando si vede l'elettrone prodotto (STOP)**. Quindi non è importante questo discorso più di tanto, anche se è una buona verifica di quello che ci aspetta.

05/05/2022

Nelle due ore abbiamo lavorato incessantemente a costruire un sistema di rivelazione di muoni e degli elettroni prodotti dal loro decadimento. Ci siamo aiutati con un multiscaler via via per stare accorti delle varie problematiche possibili.

In tutto questo stiamo assumendo che il muone decada da fermo, cioè che il **tempo che impiega a fermarsi è molto minore della sua vita media**. Bisognerebbe fare il conto bene (come corso Michael).



Come segnale di START abbiamo usato la coincidenza 5&6&not4&not3. Abbiamo aggiunto anche il not3 perché di fatto non può di certo ridurre il segnale, può solo ripulire dal rumore.

Come segnale di STOP usiamo 5&6 OR 4&3, per vedere e- che vanno nelle due direzioni separatamente. Abbiamo usato coppie per evitare *afterpulses* e in generale roba casuale.

In realtà abbiamo usato queste coppie in coincidenza con il GATE, che non è altro che lo START traslato di 50 ns (traslato perché sennò per ogni START c'era sempre un conteggio 5&6&GATE dal momento che lo START, che fa partire anche il GATE, contiene per def 5&6. Analogamente non partiva mai il 4&3). Questo era ampio 30 ns, così da perdere poca informazione di fischer (con 8tau perdi già solo il 2%). Abbiamo creato due canali diversi **separatamente** per il caso di decadimento UP e DOWN, così da poterli eventualmente distinguerli anche a scopi futuri...

Per mettere i veto (3 e 4) a cavallo di 5 e 6 abbiamo dovuto ritardare 5 e 6 di ca 30 ns e allargare la durata dei veto (tale larghezza in parte potenzialmente riduce un po il segnale). Quindi di fatto il segnale di START è traslato di ca 30 ns dal momento **vero** in cui è avvenuto l'evento. Quindi anche i 5 e 6 ma anche i 3 e 4 usati per il segnale di STOP sono stati traslati di 30 ns **perché sennò non sarebbe coerente il sistema di acquisizione, ovvero le Δt tra gli stop e gli start sarebbero sistematicamente sottostimate di circa 30 ns.**

Non avendo fatto in tempo a registrare una presa dati significativa in questa disposizione, abbiamo messo a prendere dati il sistema nel weekend, sperando in bene...