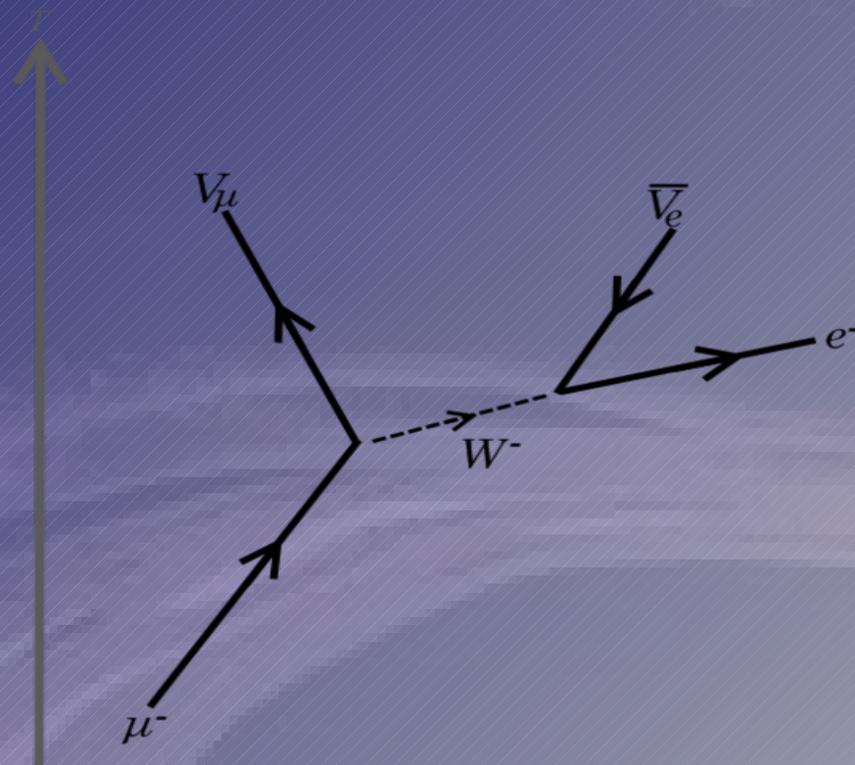


# La Misura della Vita Media del Muone



# Obiettivo del corso

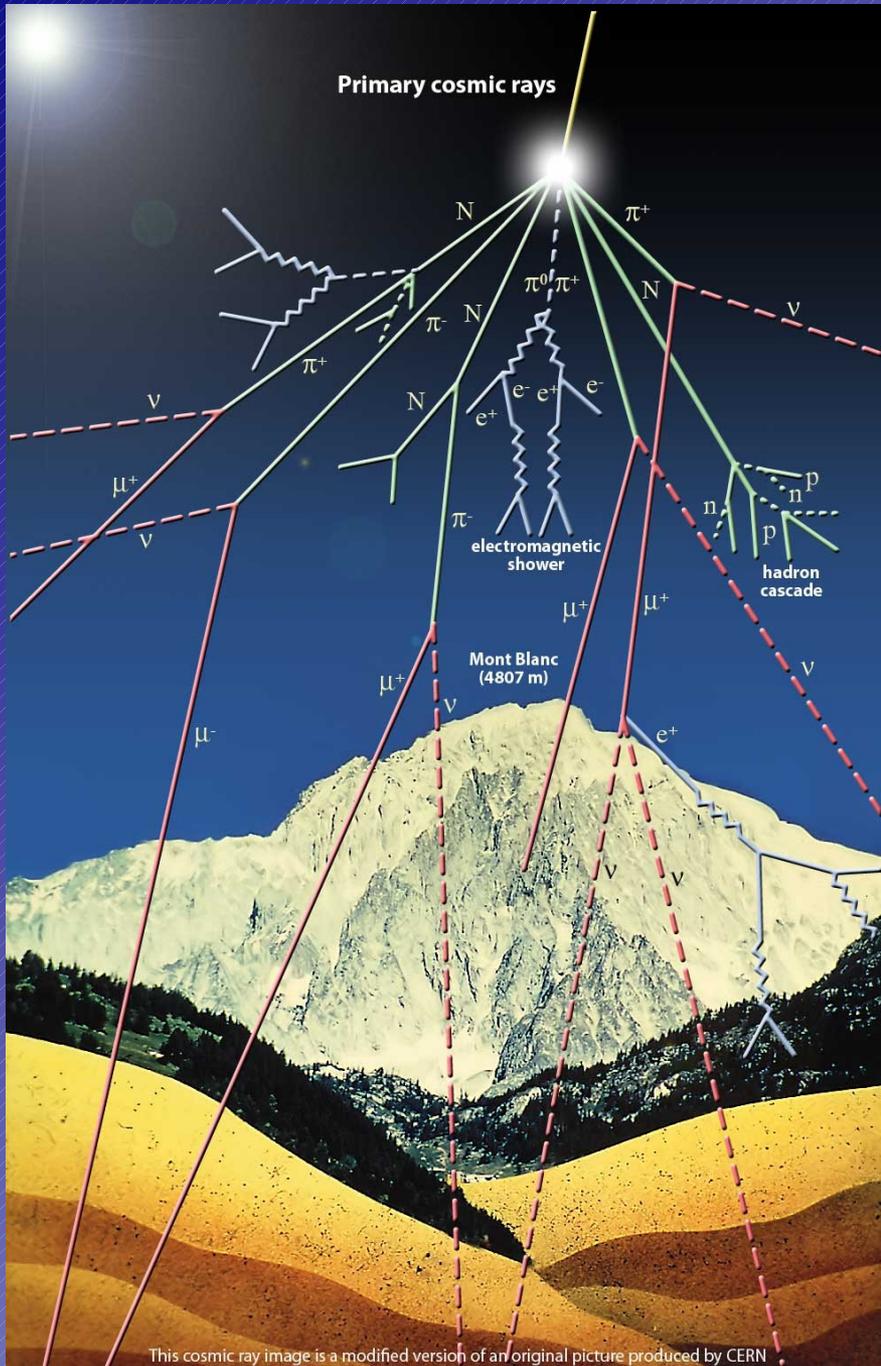


Capire in poche ore come si misura una proprietà fondamentale di una particella elementare: la sua vita media.

- Cos'è un muone?
- Che cosa si intende per vita media di una particella?
- Come si fa a rivelare il passaggio di una particella elementare?
- Come si fa ad essere sicuri che quello che si vede con uno strumento è veramente quello che cerchiamo?
- Come si estrae dai dati sperimentali una misura con il suo errore?

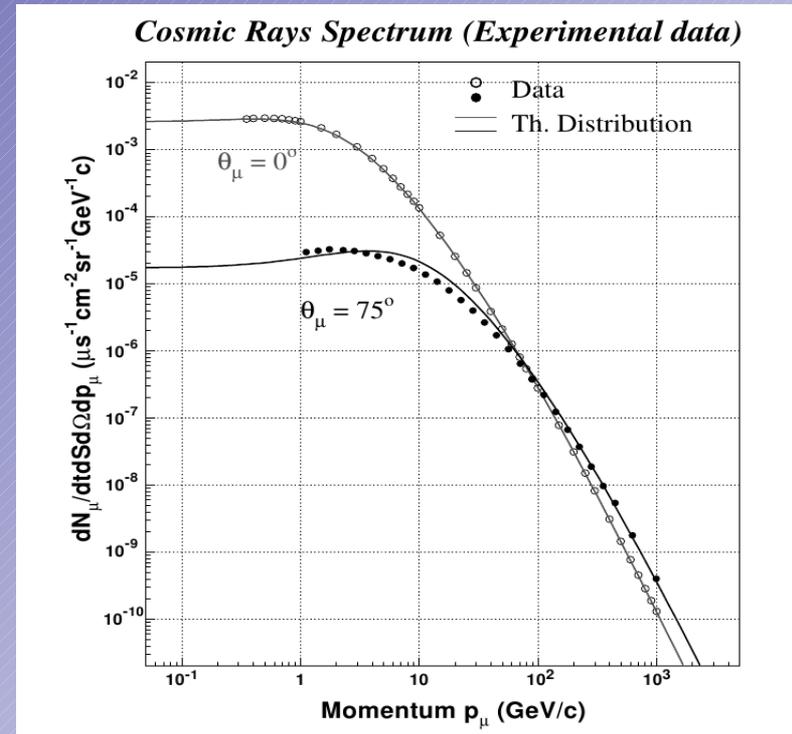
Per tutto questo abbiamo preparato una serie di esercizi, prove pratiche con rivelatori, analisi dati con fogli di calcolo accompagnati da spiegazioni dei vari fenomeni per ripercorrere passo passo i vari elementi che compongono la misura finale.

# La sorgente dei $\mu$

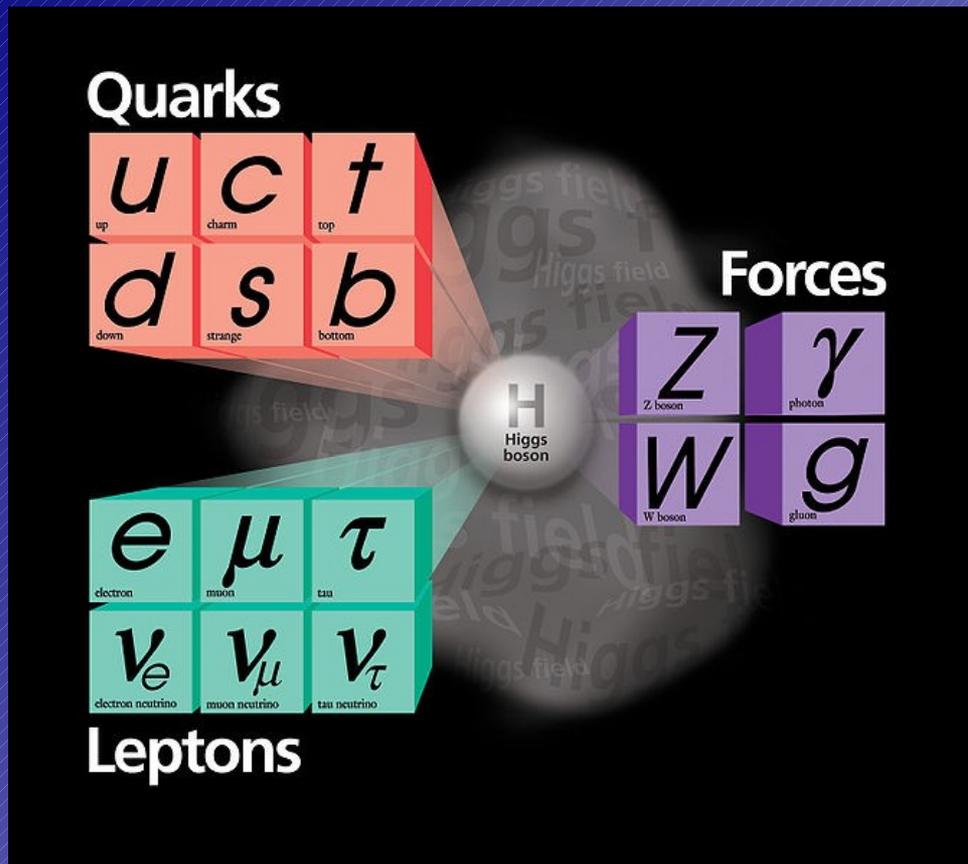


$$I \sim 1 \text{ min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

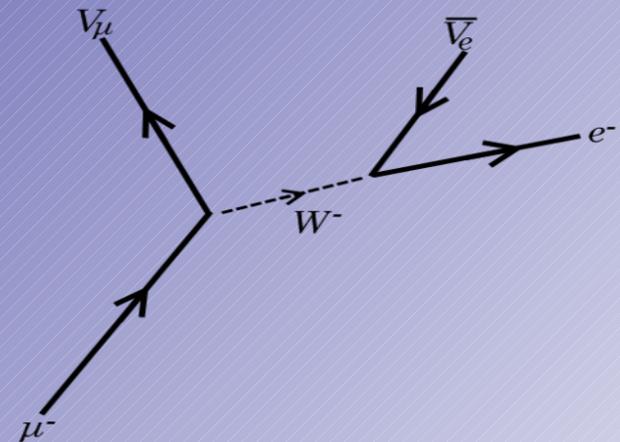
I muoni sono prodotti in abbondanza negli sciami adronici creati negli urti con l'atmosfera dei raggi "cosmici" primari provenienti dallo spazio.



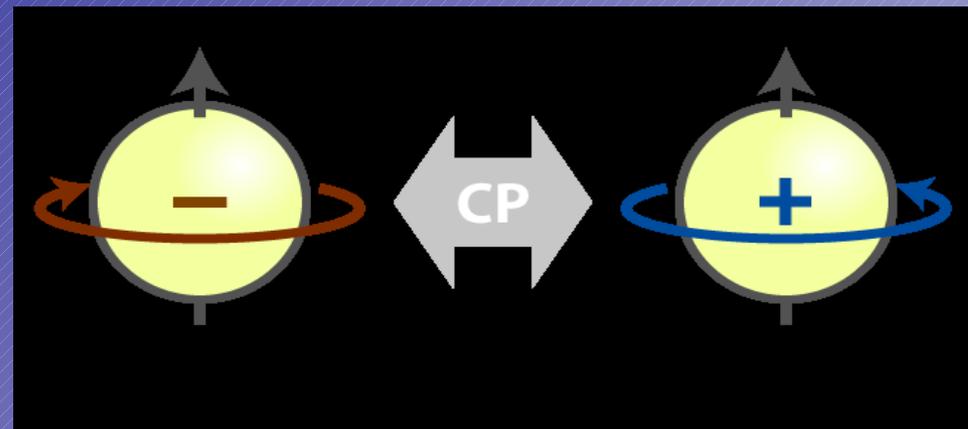
# Il Muone



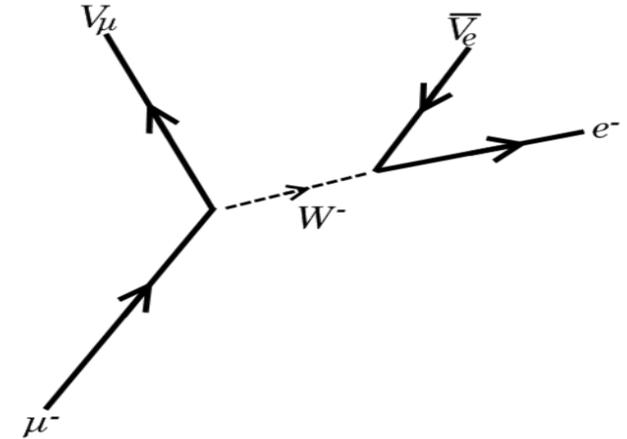
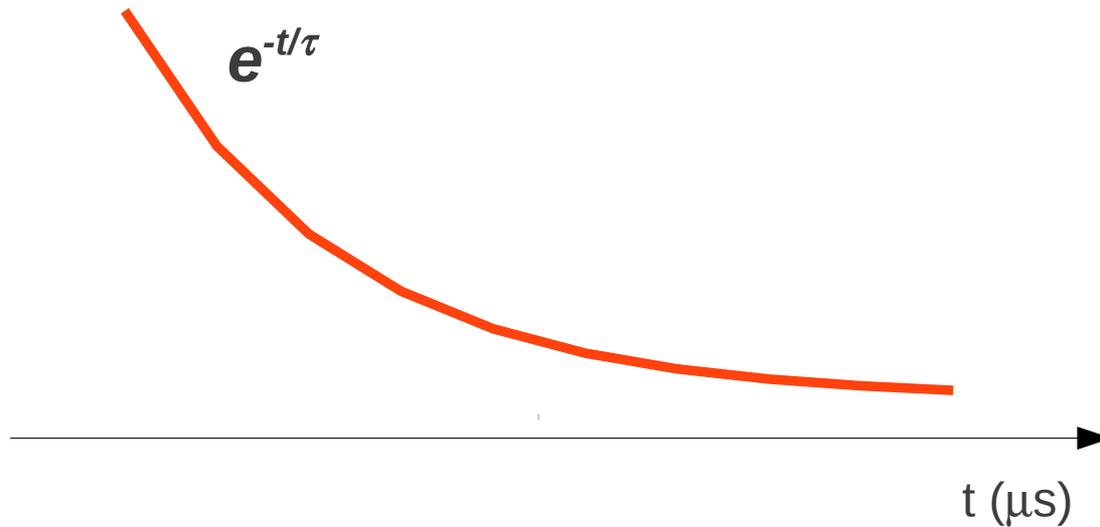
Il muone è una particella elementare simile all'elettrone ma con massa 200 volte maggiore (105 MeV). Il muone **non è una particella stabile!** Al contrario dell'elettrone infatti si trasforma (decade) in un elettrone e due neutrini con un tempo caratteristico (vita media) di circa 2.2  $\mu\text{s}$  ( $1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{s}$ ).



Come l'elettrone, anche il muone ha carica negativa ( $\mu^-$ ) mentre la sua **antiparticella** ha carica positiva ( $\mu^+$ ).



## Il decadimento del $\mu$



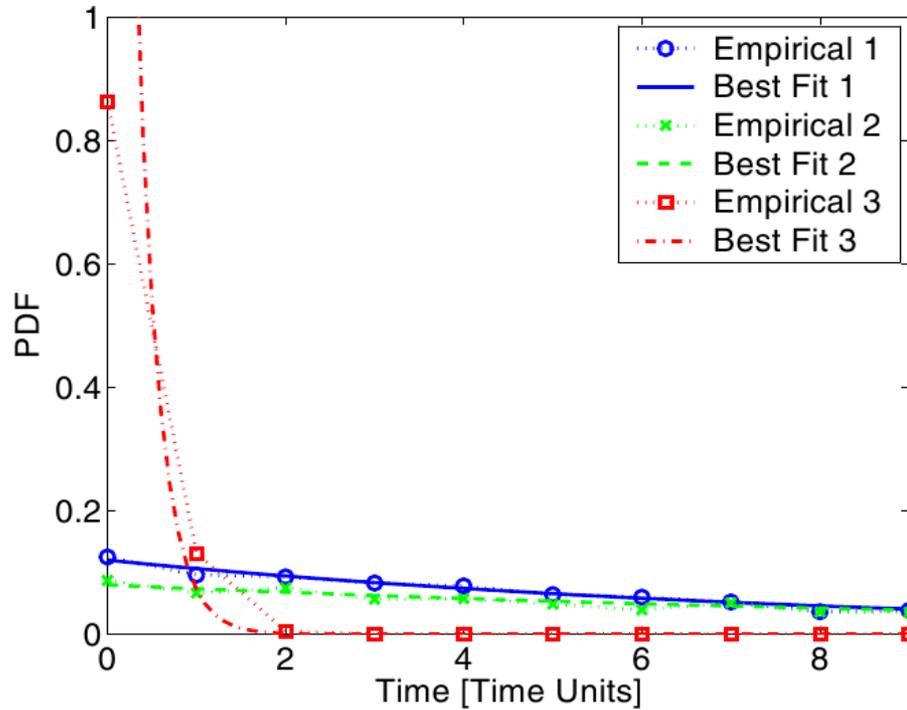
Il muone ha **in ogni istante** una probabilità  $\Delta t/\tau$  di decadere, nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  successivo, in un elettrone e due neutrini, dove  $\tau$  è la sua **vita media** ( $\sim 2.2 \mu\text{s}$ ). La probabilità che **non** decada (*sopravviva*) al tempo  $t=\Delta t$  è:  $(1-\Delta t/\tau)$ . Che sopravviva al tempo  $t=2\Delta t$ :  $(1-\Delta t/\tau)^2$ ;  $t=3\Delta t$ :  $(1-\Delta t/\tau)^3$  etc. etc..

In generale per  $t=N\Delta t$ :

$$p(t)=(1-t/N\tau)^N \Rightarrow e^{-t/\tau}$$

# Processi poissoniani

Tempo di arrivo tra due chiamate in una rete di telefoni cellulari.



Il processo poissoniano descrive come si distribuiscono nel tempo eventi che si verificano con una frequenza costante  $\nu$ . In un intervallo di tempo  $t$  la probabilità che si verifichino  $n$  eventi è pari a:

$$P_n(\nu t) = \frac{(\nu t)^n}{n!} e^{-\nu t}$$

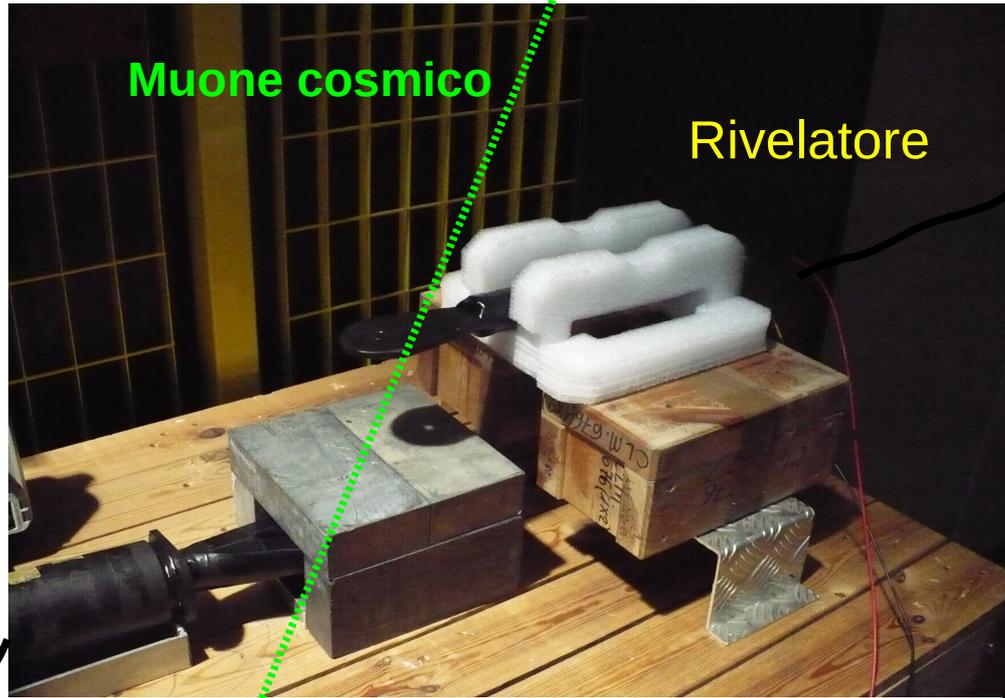


Probabilità che l'evento 1 avvenga un tempo  $T_1$  dopo l'evento 0 ( $T_0=0$ ):

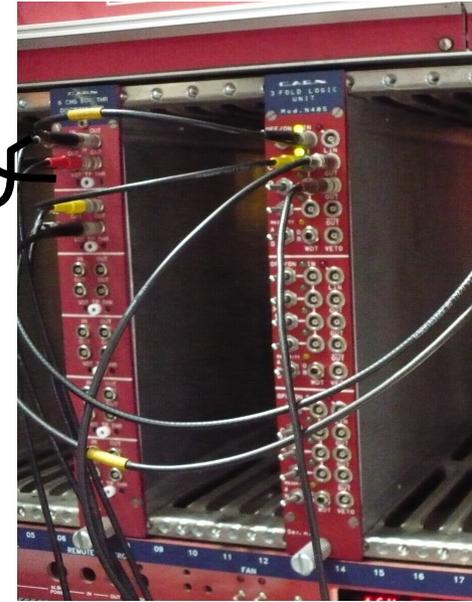
- probabilità che ci siano 0 eventi tra  $T_0$  e  $T_1$ :  $e^{-\nu T_1}$
- probabilità di avere un evento al tempo  $T_1$  in un intervallo  $dT$ :  $\nu dT$

$$\rightarrow p(T_1) dT = e^{-\nu T_1} \nu dT$$

# Misura della distanza temporale tra due cosmici consecutivi

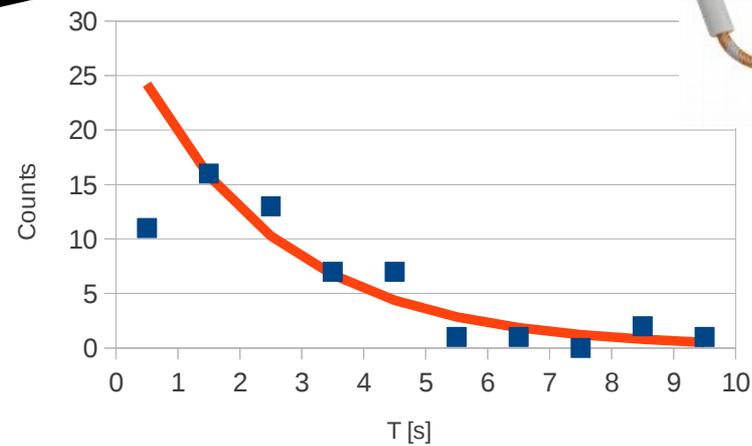


Elettronica di lettura



Cavo lemo

Poisson



■ Data  
— NO e-t/t

$\mu$

$h=10$  km

Tempo di volo:

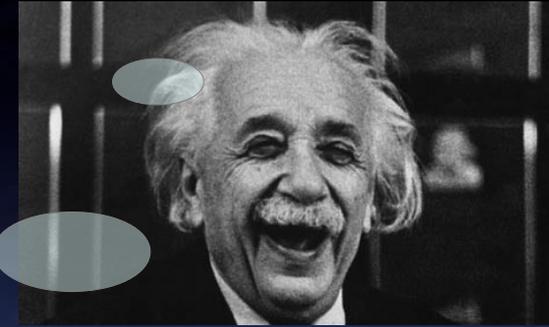
$$T=10 \text{ km}/c=??$$

Probabilità di sopravvivenza:

$$e^{-T/\tau} = ??$$

$$c \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

# La dilatazione dei tempi propri



$\mu$

$h=10$  km

Tempo di volo:

$$T=10 \text{ km}/c=33 \mu\text{s}\sim 16\tau$$

Probabilità di sopravvivenza:

$$e^{-T/\tau}=3\times 10^{-7}=0.0000003$$

Il tempo per il muone scorre più lentamente del nostro di un fattore pari alla sua energia diviso la sua massa:  $T_{\mu}=T/\gamma$  dove  $\gamma=E/m_{\mu}$ .

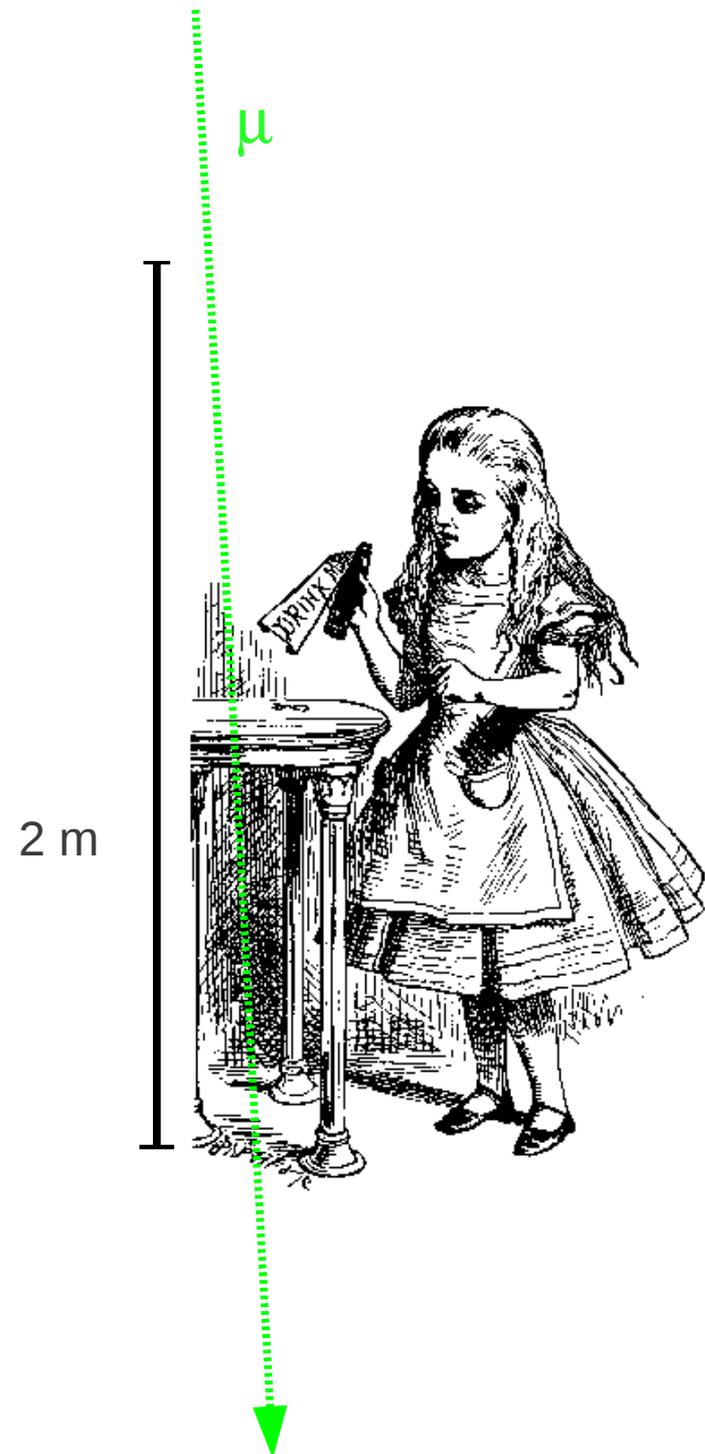
Per  $E\sim 3$  GeV ( $m_{\mu}=105$  MeV):  $\gamma=3/0.105\sim 29$

$$e^{-T/\gamma\tau}=e^{-33/(29*2.2)}=0.6 \Rightarrow 60\% \text{ di sopravvivenza!}$$

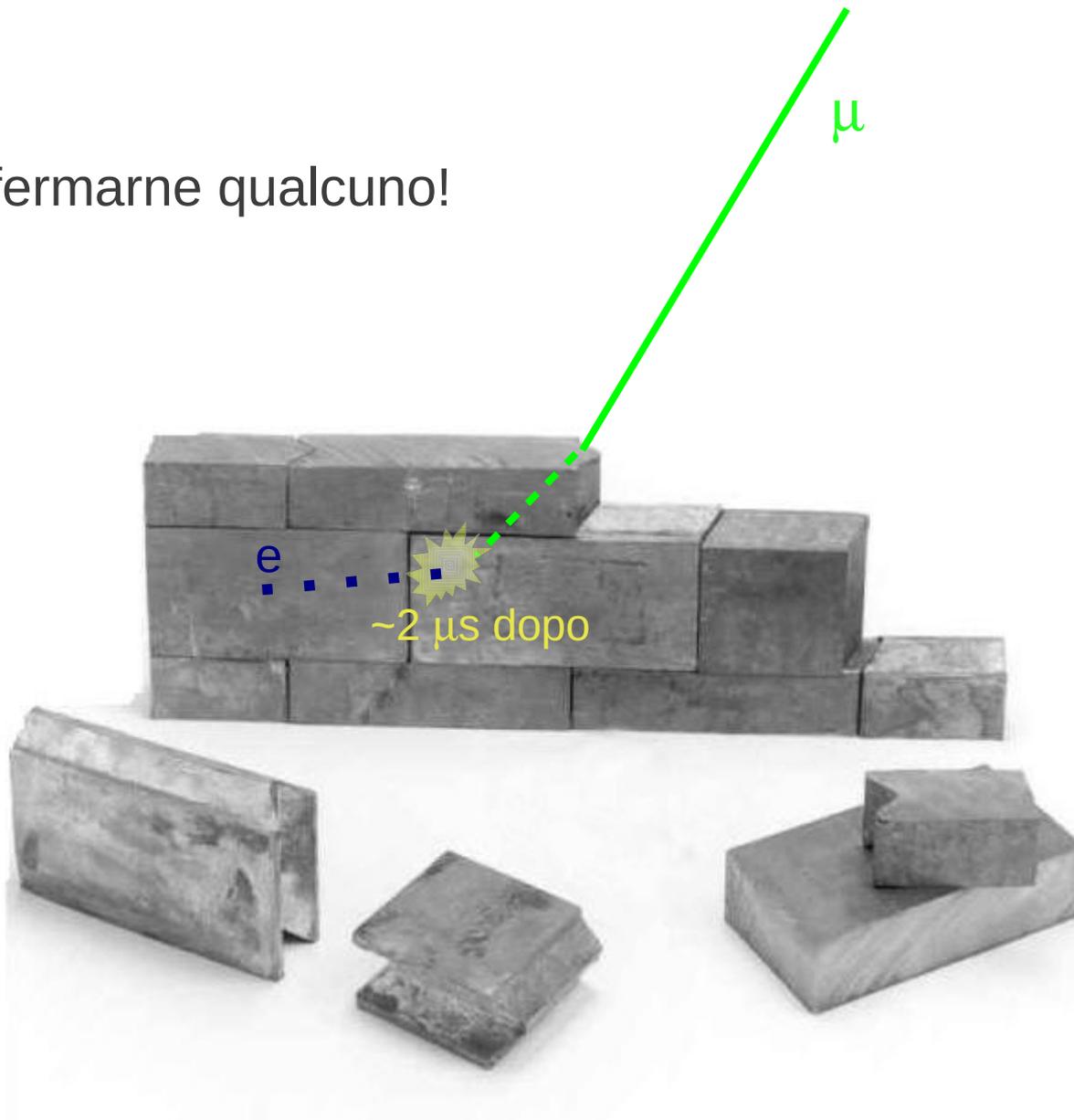
$c\sim 3\times 10^8$  m/s



In 2 metri sopravvive circa il 99.9896% dei muoni pari ad **un decadimento a settimana per cm<sup>2</sup>**.

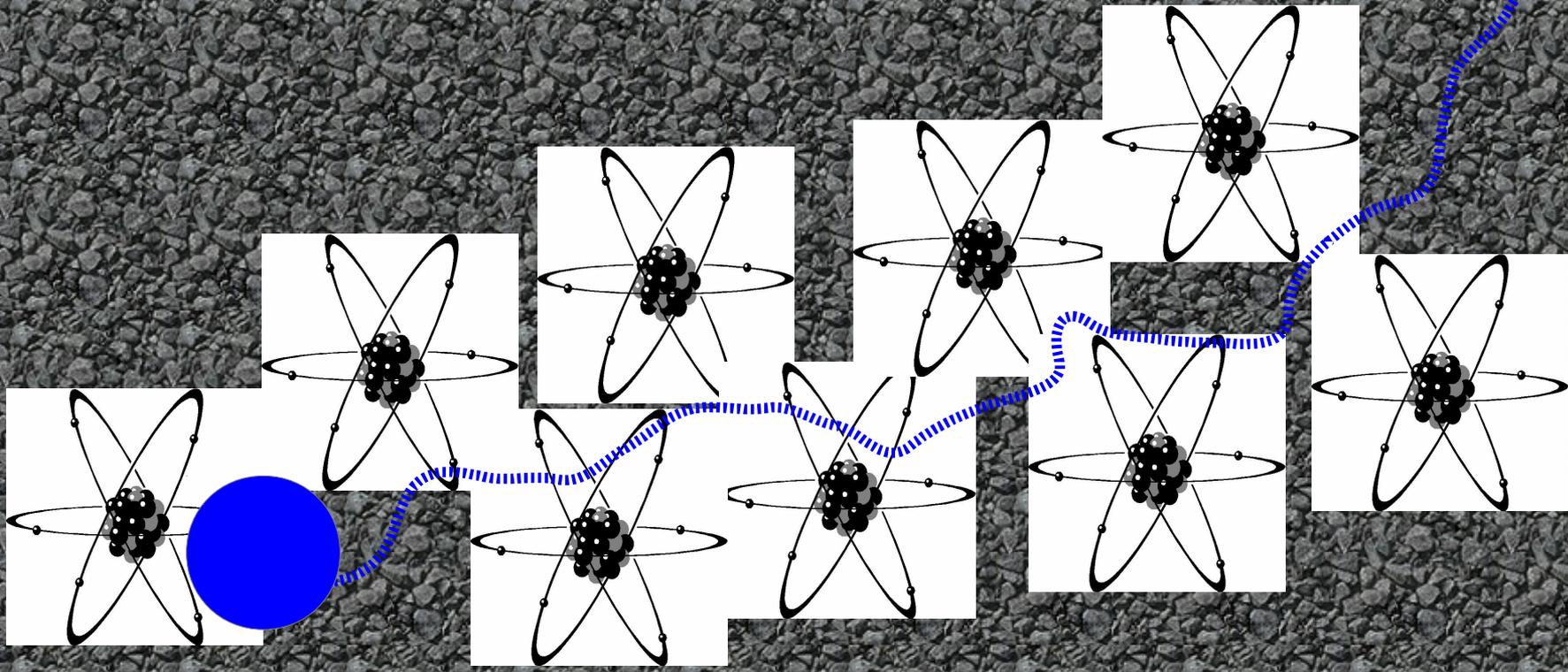


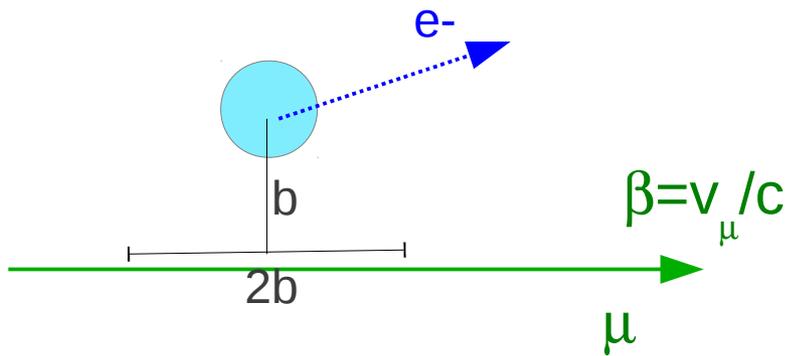
... meglio fermarne qualcuno!





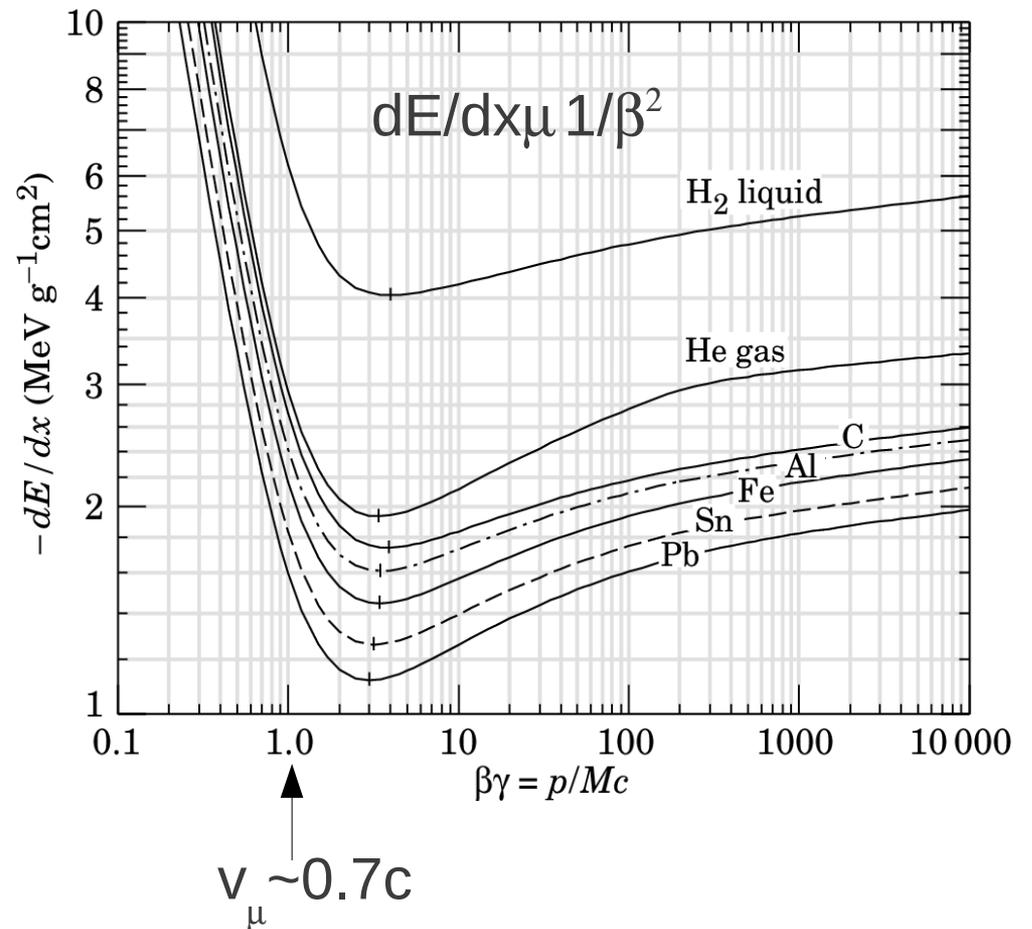
Un muone viene frenato dagli elettroni che incontra, come le bocce dai granelli di sabbia.





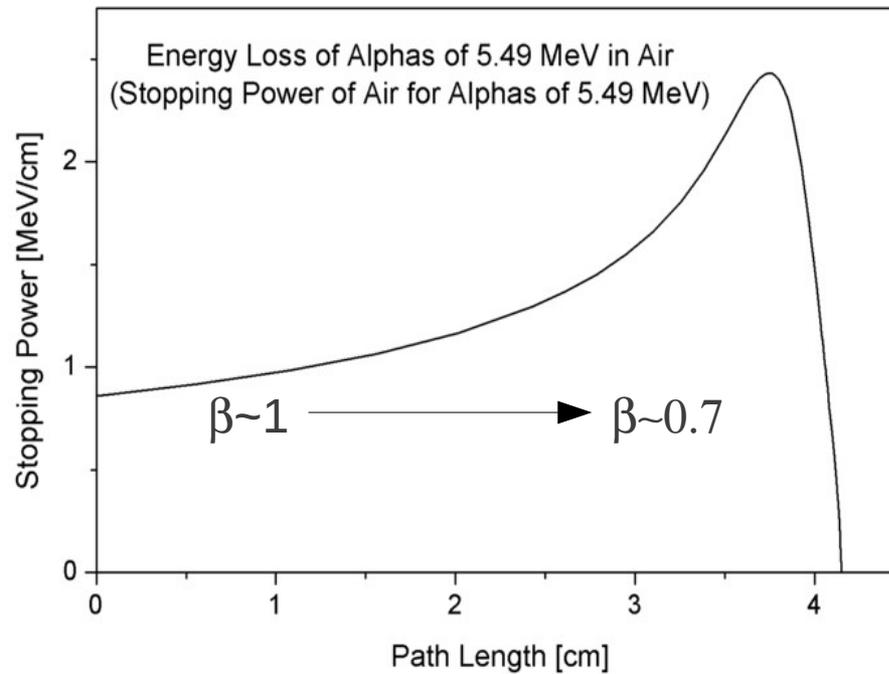
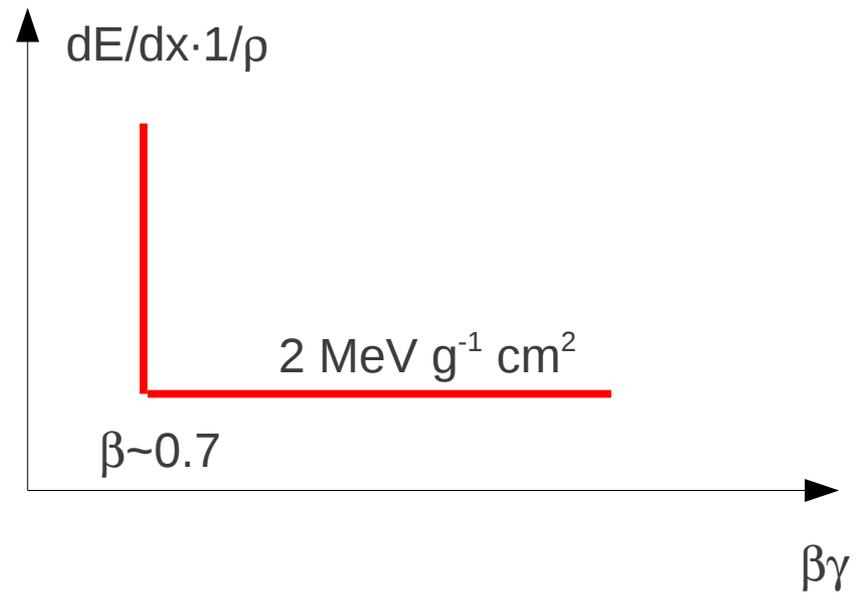
$$m_e v_e = F \Delta t = e E 2b / v_\mu$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{1}{v_\mu^2}$$

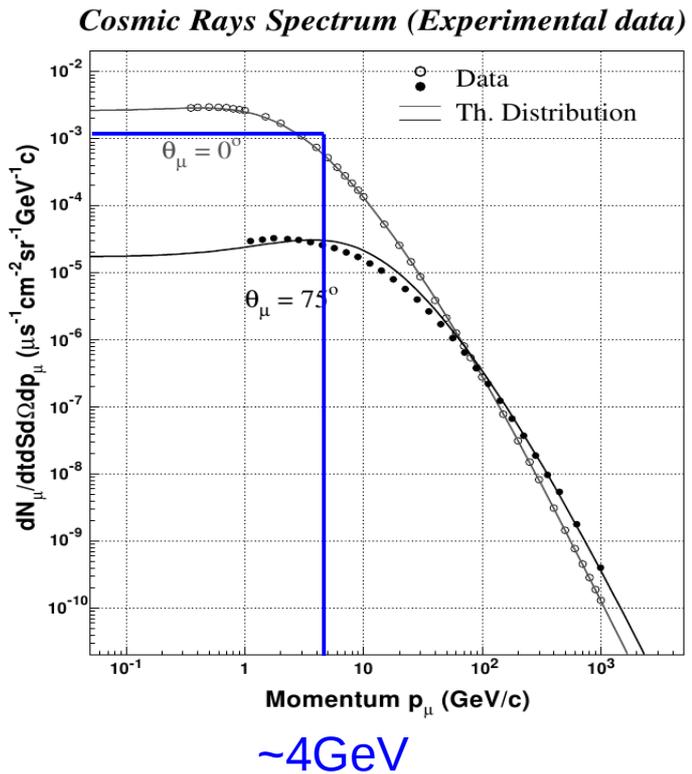


Il muone urta gli elettroni della materia che lo circonda trasferendogli impulso ( $dp = F dt$ ). Se  $b$  è la minima distanza dall'elettrone, allora la maggior parte dell'impulso viene trasferita quando il muone transita in una regione lunga  $2b$  attorno al punto di minimo approccio. Quindi il trasferimento di impulso avviene in un tempo  $\Delta t = 2b / v_\mu$ . Ne deriva che l'energia acquistata dall'elettrone (e quindi persa dal muone) è proporzionale a  $1/v_\mu^2$ .

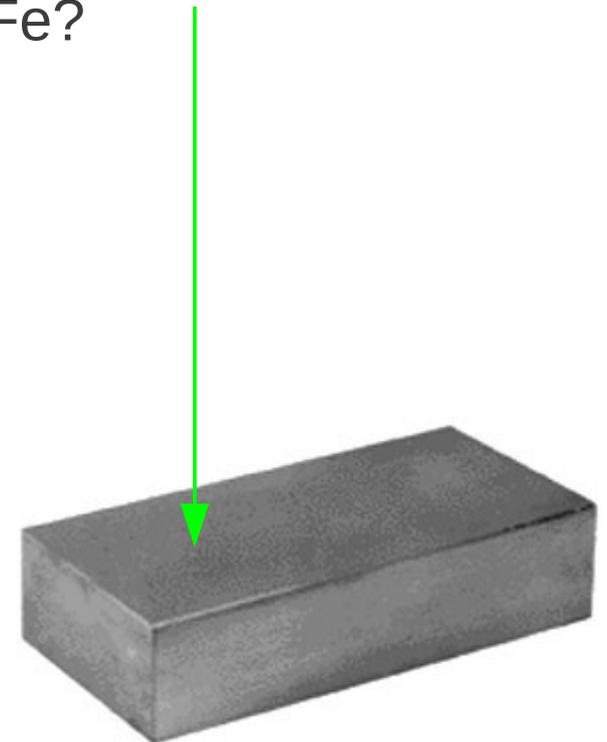
Finché  $\beta \sim 1$  il muone perde sempre la stessa quantità di energia per cm di materia attraversata. Appena la velocità scende a  $\sim 0.7c$  il muone perde velocemente tutta la sua energia cinetica residua.



# Quanti $\mu$ si fermano in 5 cm di Fe?

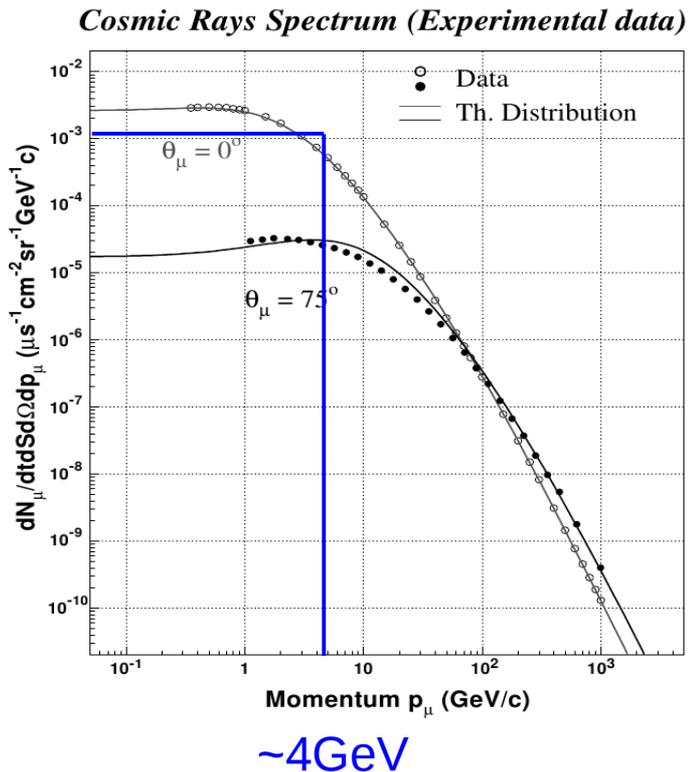


5 cm

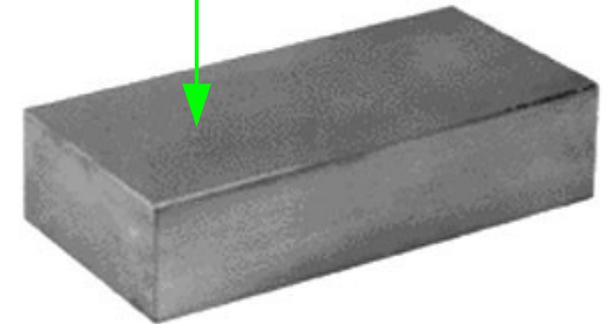


$$\Delta E = (dE/dx)_{Fe} \rho h = ?? \text{ MeV}$$

# Quanti $\mu$ si fermano in 5 cm di Fe?



5 cm



$$\Delta E = (dE/dx)_{Fe} \rho h = 1.451 \times 7.84 \times 5 = 57 \text{ MeV}$$

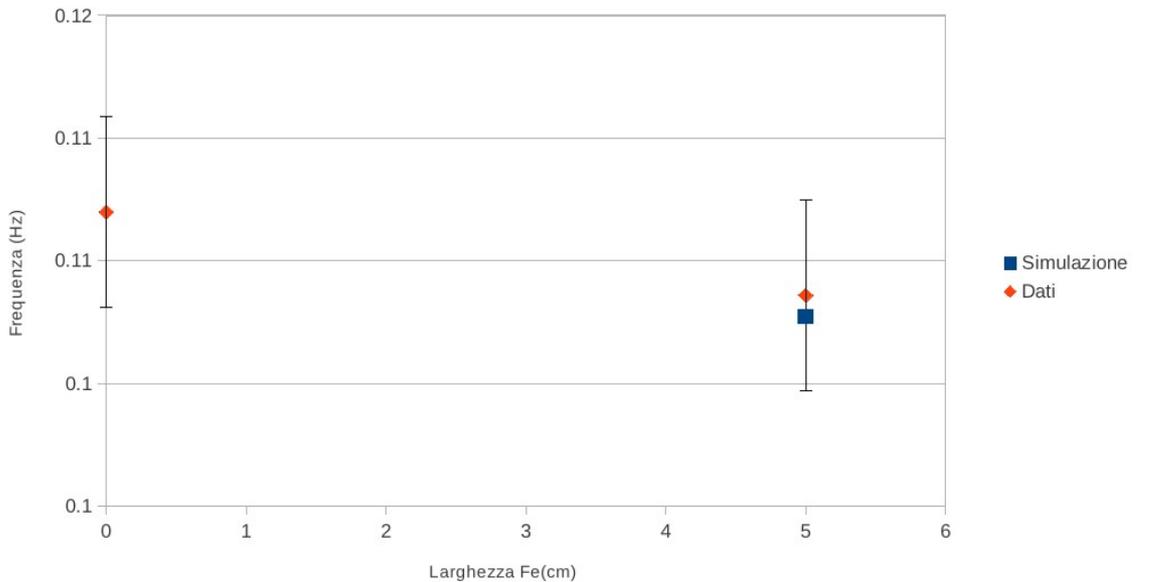
Se assumiamo che lo spettro energetico dei muoni è costante fino a  $\sim 4 GeV$  e poi nullo, la frazione di muoni fermati in 5 cm di Fe è pari a:

$$57 MeV / 4 GeV \sim 1.4\% \approx 1\% \div 2\%$$

Da una simulazione (un conto più dettagliato) abbiamo ottenuto circa 4%

Proviamo a verificarlo?

# Misura della frazione di muoni fermati in blocchi di Fe



## Calcolo dell'errore

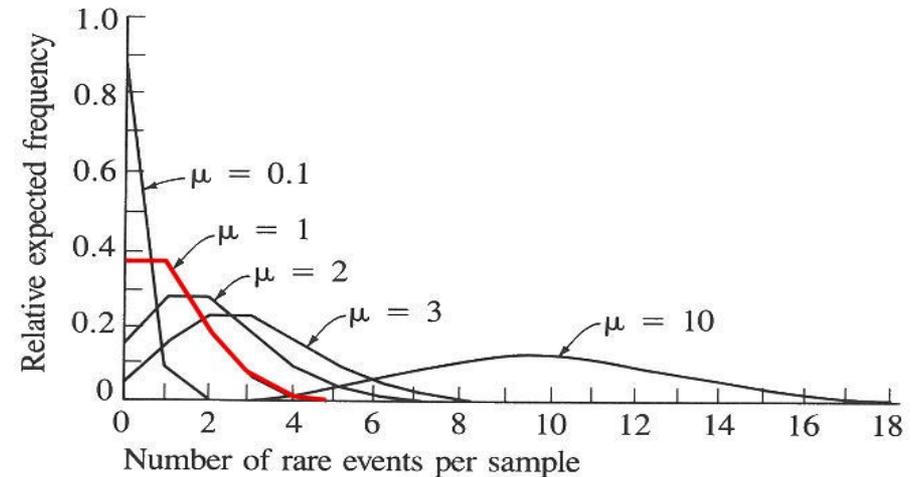
I conteggi seguono la statistica di Poisson. Se si contano  $N$  eventi in un tempo  $T$ , l'errore atteso sui conteggi è pari a  $\sqrt{N}$ .

La stima della frequenza è

**$v = N/T$  con errore  $\sqrt{N/T}$ .**

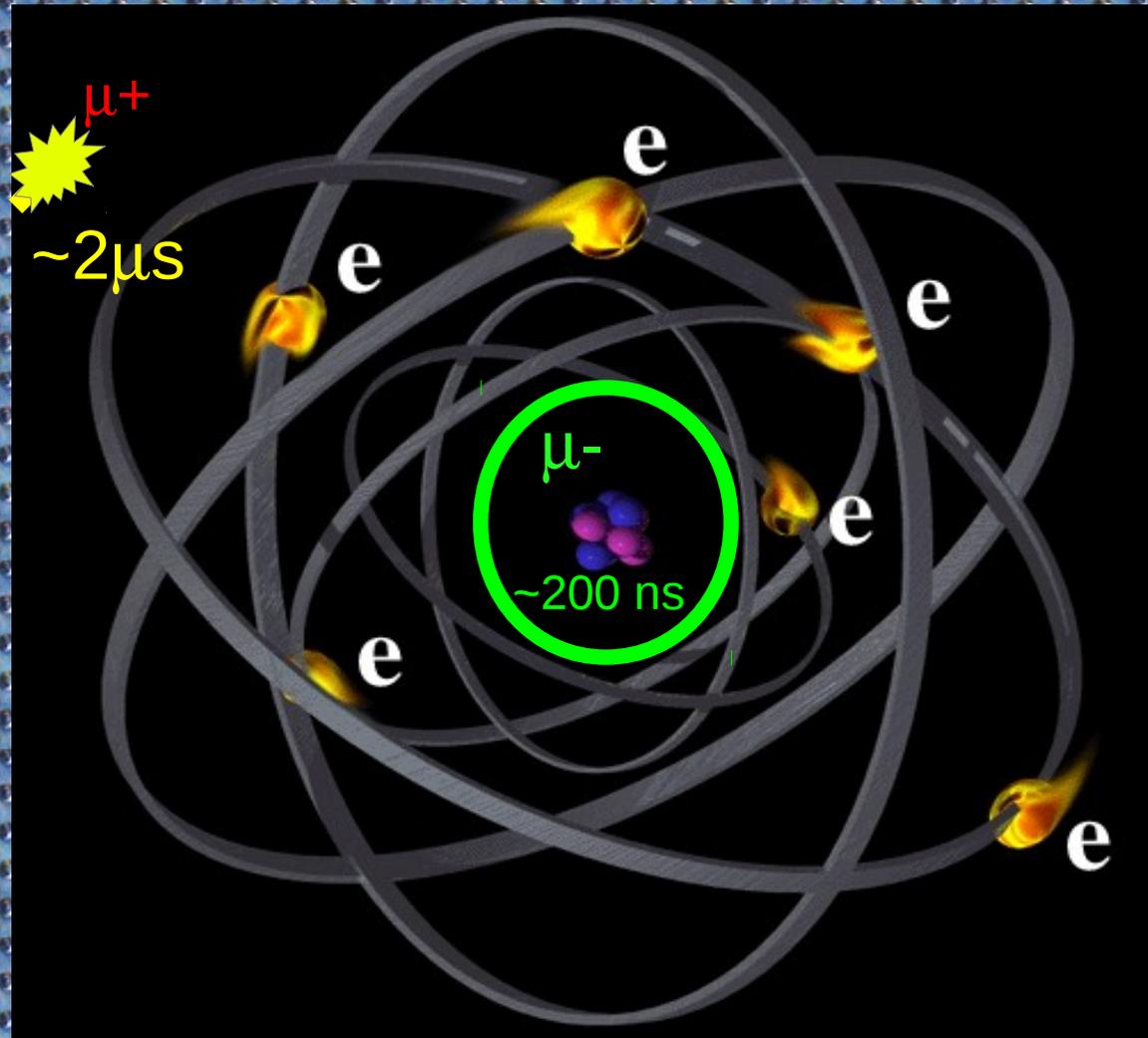
Con 100 conteggi si ha una stima

**$\Delta v/v = 10/100 = 10\%$**



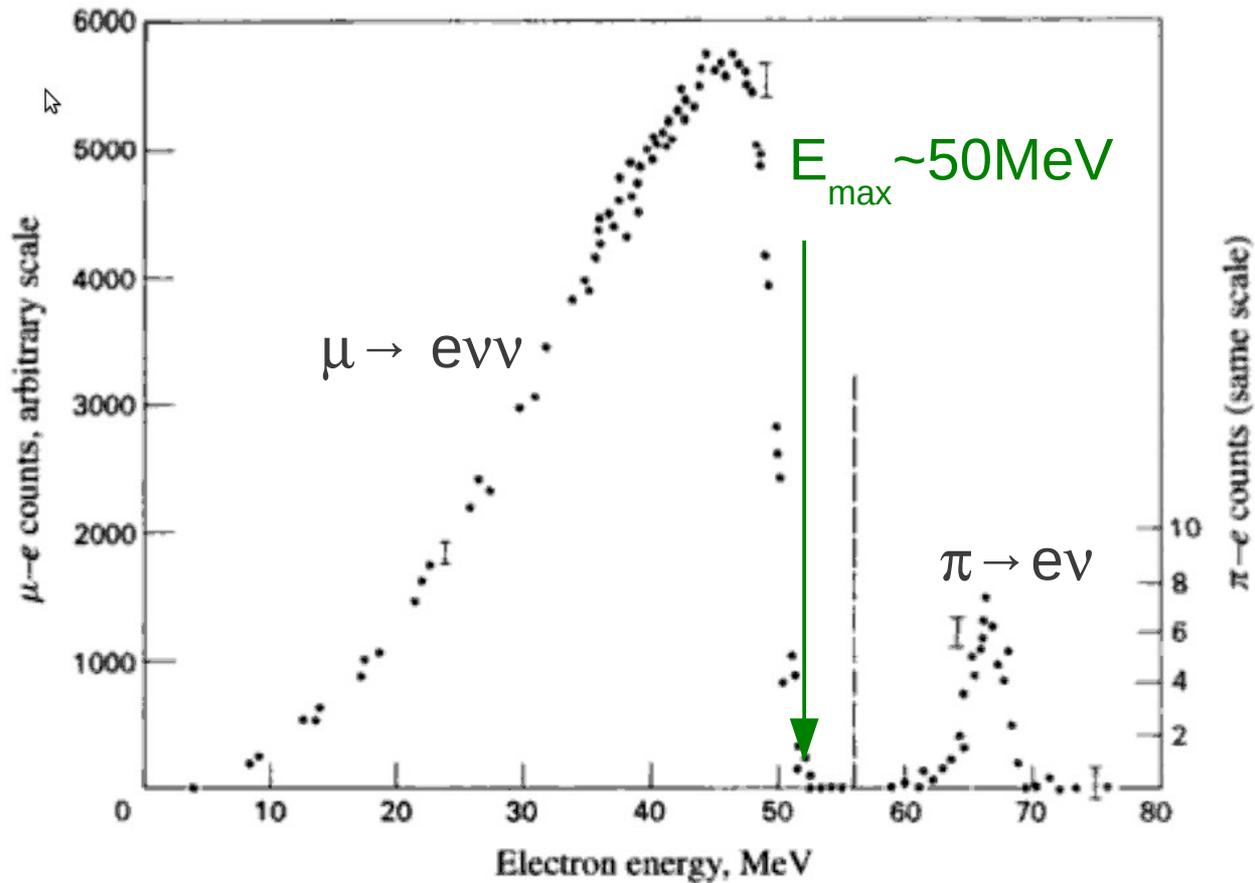


All'interno del ferro i muoni negativi vengono attratti dai nuclei (positivi) degli atomi circostanti e in seguito assorbiti. Il tutto in un tempo pari a circa 200 ns. Al contrario i muoni positivi sono respinti dai nuclei e non vengono assorbiti. Decadranno quindi in  $e^+ \nu \bar{\nu}$ .



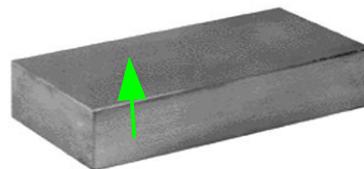
Attenzione! Se il  $\mu^-$  decade entro 200 ns potreste vedere degli  $e^-$  uscire dal ferro.

# Distribuzione dell'energia dei positroni dal decadimento del $\mu$



Assumendo che l'elettrone perde energia nella materia come il muone, quanti cm percorre nel ferro?

5 cm I



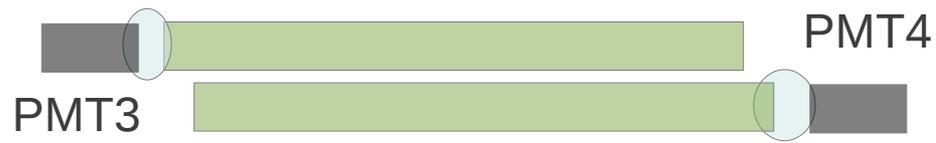
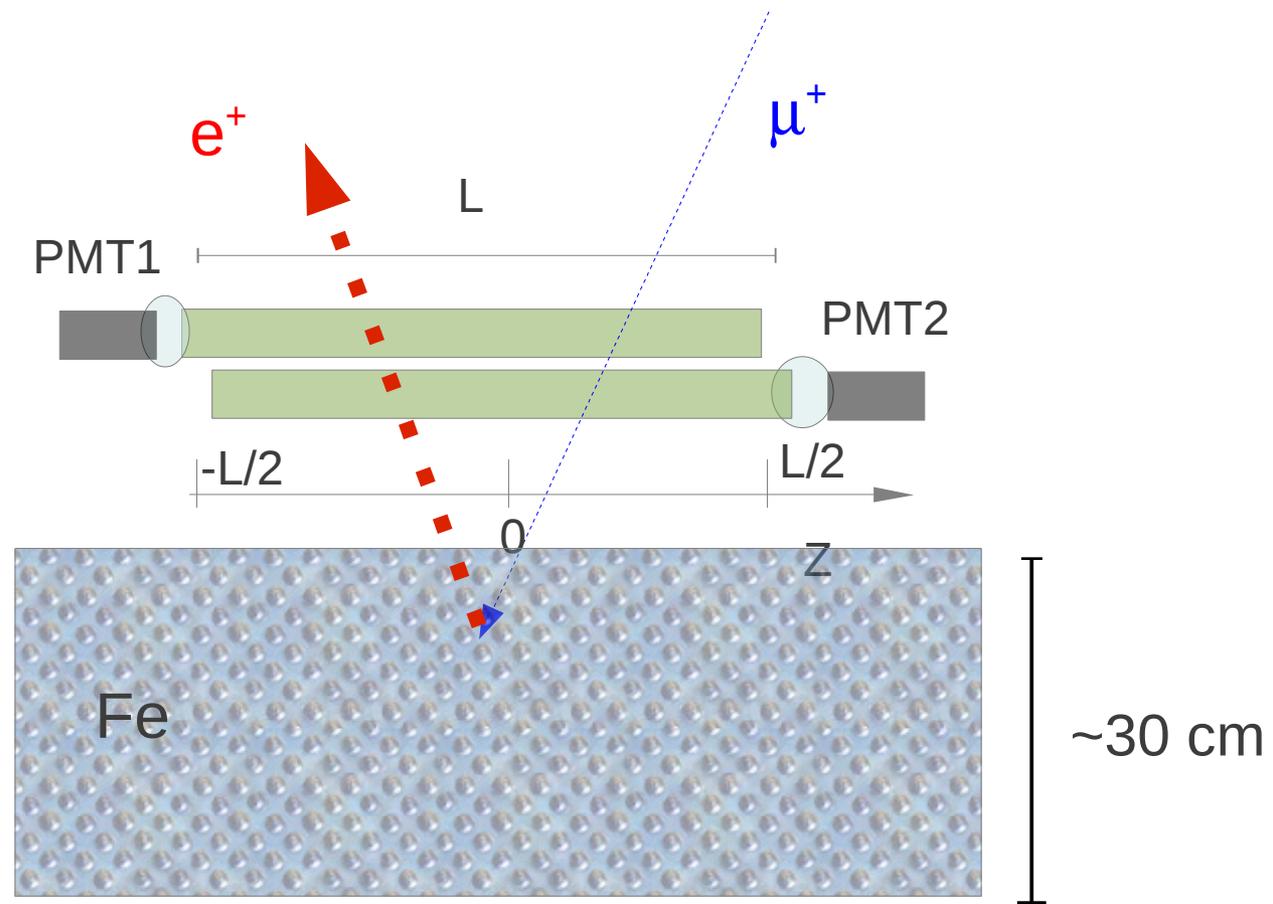
5 minuti per un caffè ...



www.shutterstock.com · 75202609

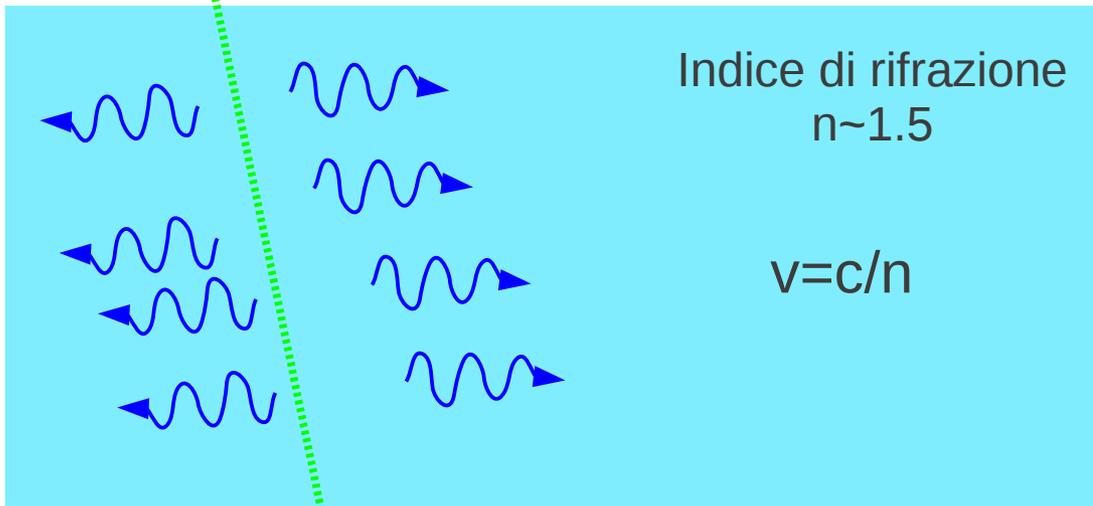
# Il rivelatore



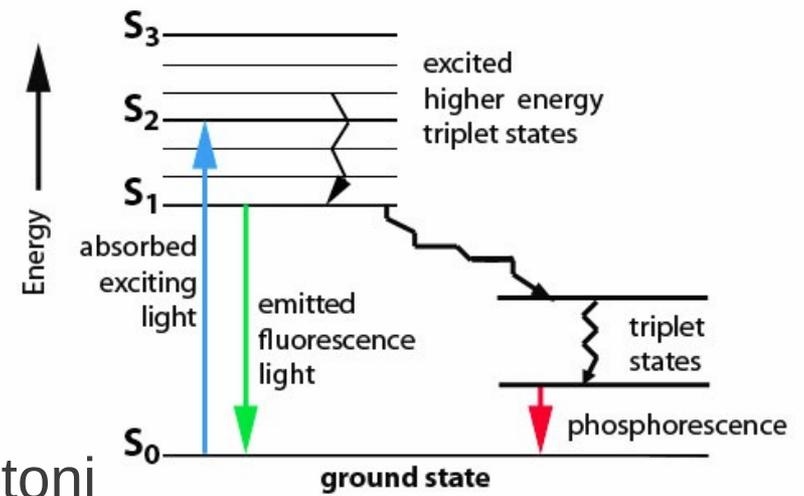


# Scintillatori plastici

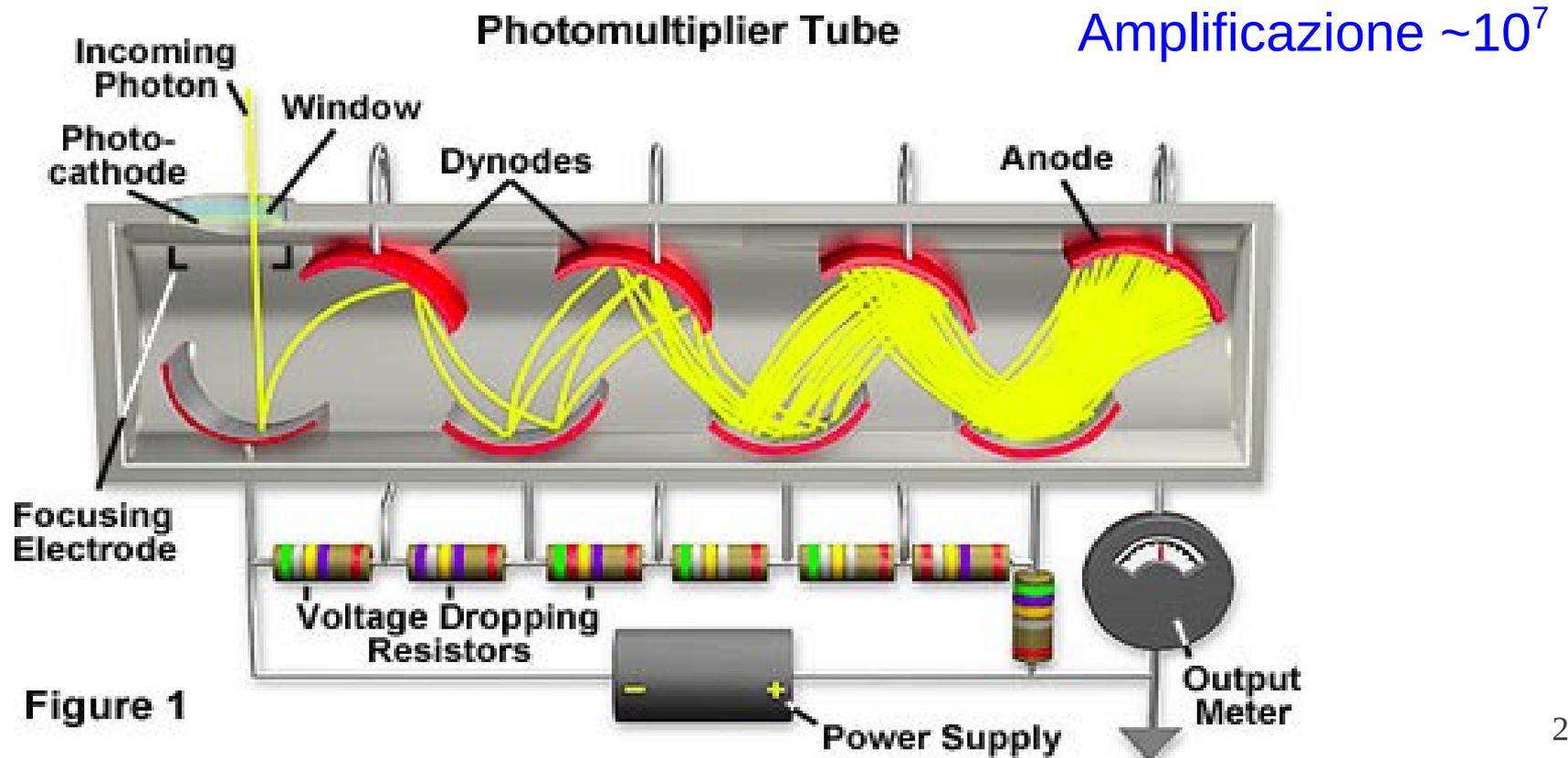
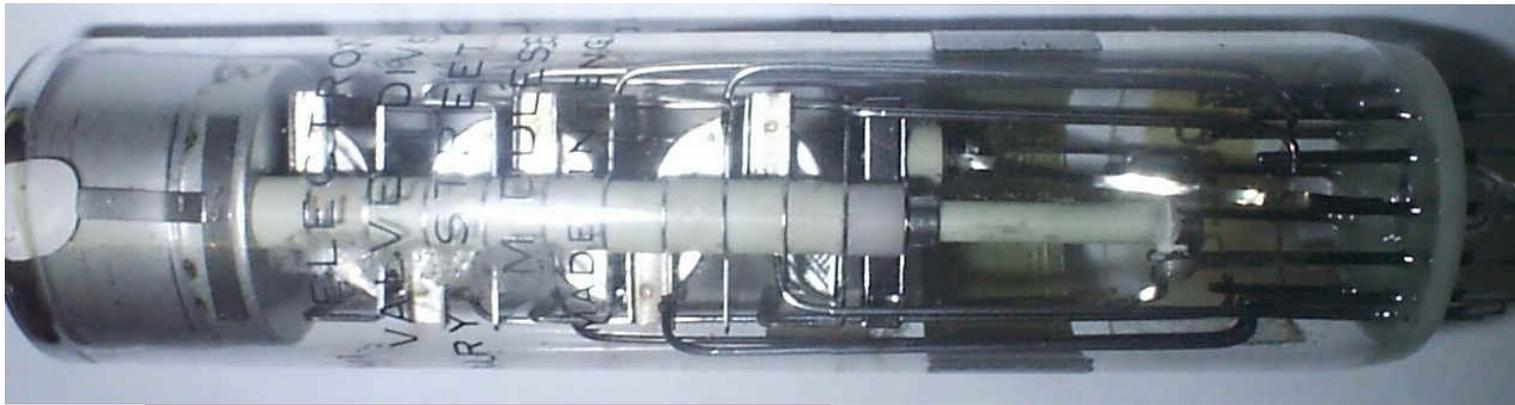
Una particella carica che attraversa un materiale scintillante, eccita il moto vibrazionale delle molecole che, diseccitandosi, emettono luce visibile. Circa **1 fotone ogni 100 eV** depositati.



$$dE/dx \sim 2 \text{ MeV/cm} \Rightarrow 2 \text{ MeV}/100 \text{ eV} \sim 20000 \text{ fotoni}$$



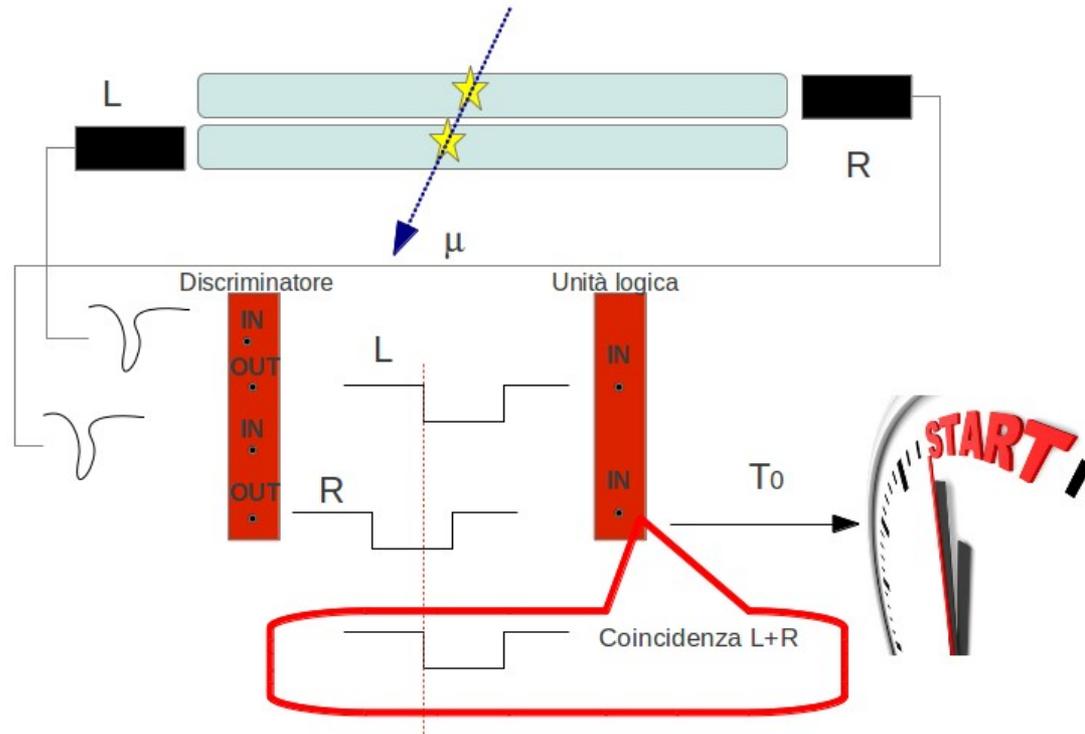
# I fototubi



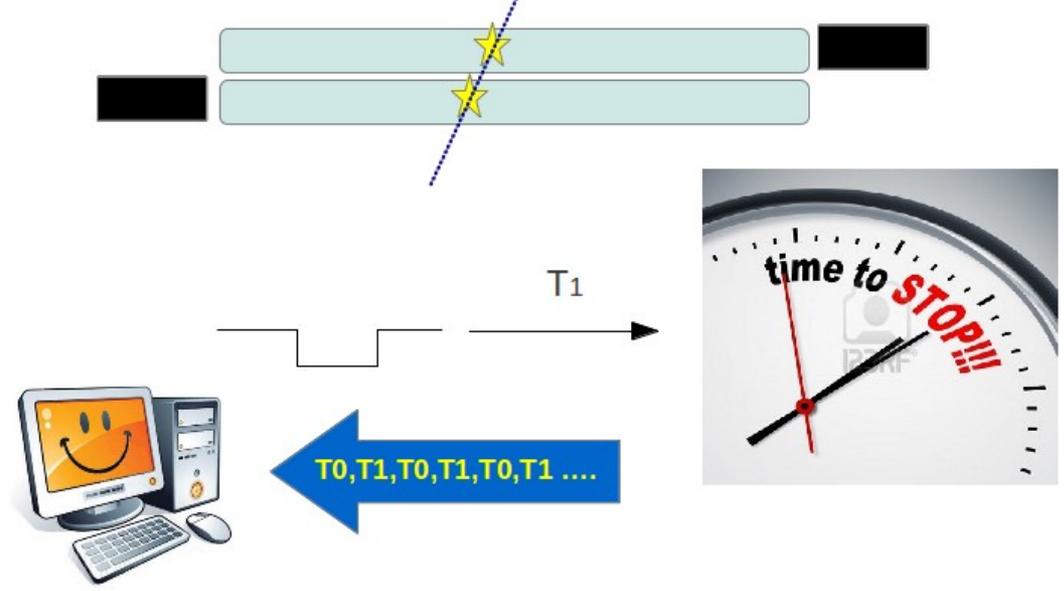


Lahur Sessa, guardando la scacchiera, gli disse: «Tu mi darai un chicco di grano per la prima casa, due per la seconda, quattro per la terza, otto per la quarta e così via». Il re rise di questa richiesta, meravigliato del fatto che il brahmano potesse chiedere qualunque cosa e invece si accontentasse di pochi chicchi di grano. Il giorno dopo i matematici di corte andarono dal re e lo informarono che per adempiere alla richiesta del monaco non sarebbero bastati i raccolti di tutto il regno per ottocento anni. In questo modo, Lahur Sessa insegnò al re che una richiesta apparentemente modesta può nascondere un costo enorme. In effetti, facendo i calcoli, il brahmano chiese 18.446.744.073.709.551.615 (18 **trilioni** 446 **biliardi** 744 **bilioni** 73 **miliardi** 709 **milioni** 551 **mila** 615) chicchi di grano.

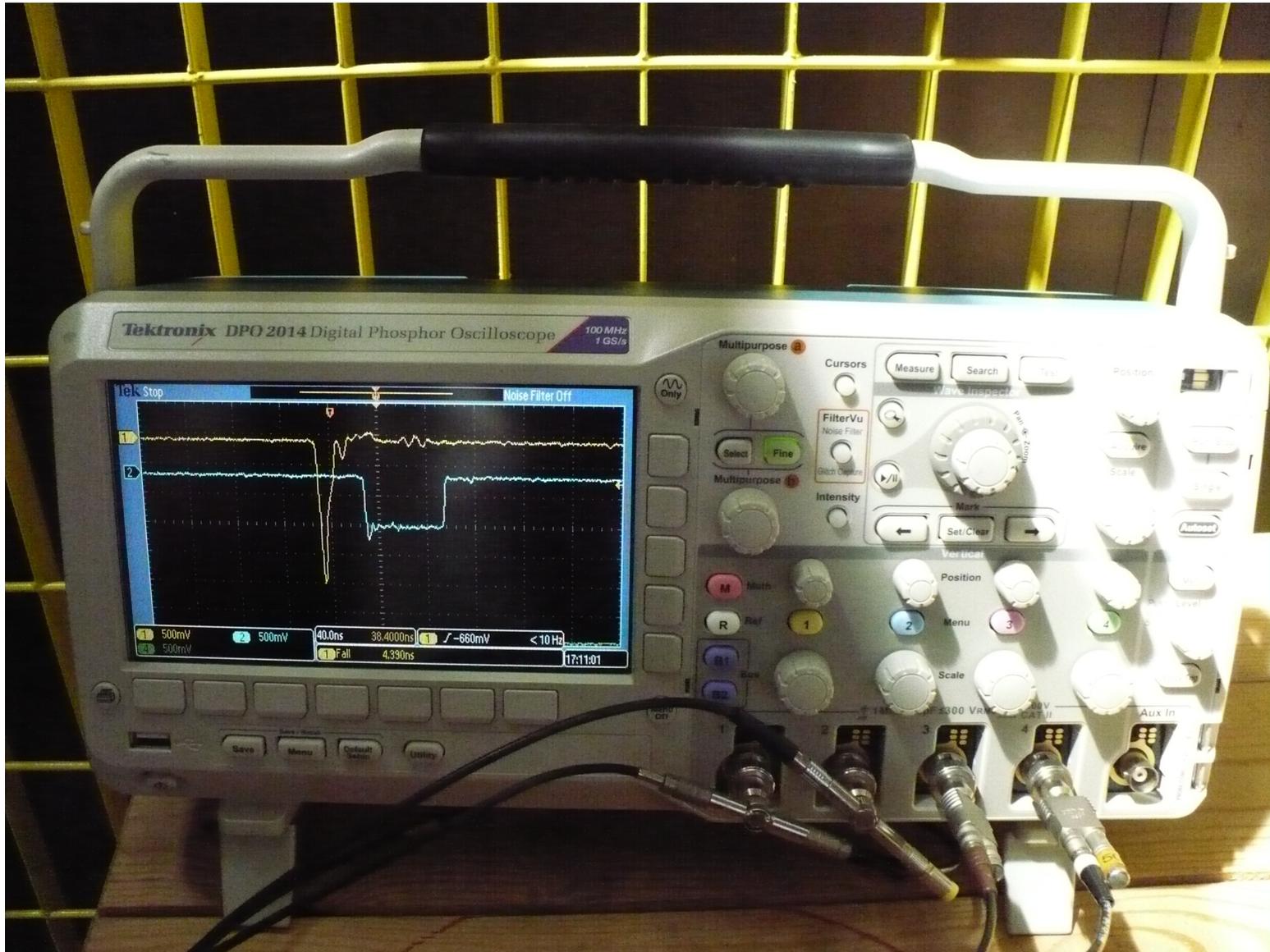
$$2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + \dots + 2^{63} = 2^{64} - 1$$



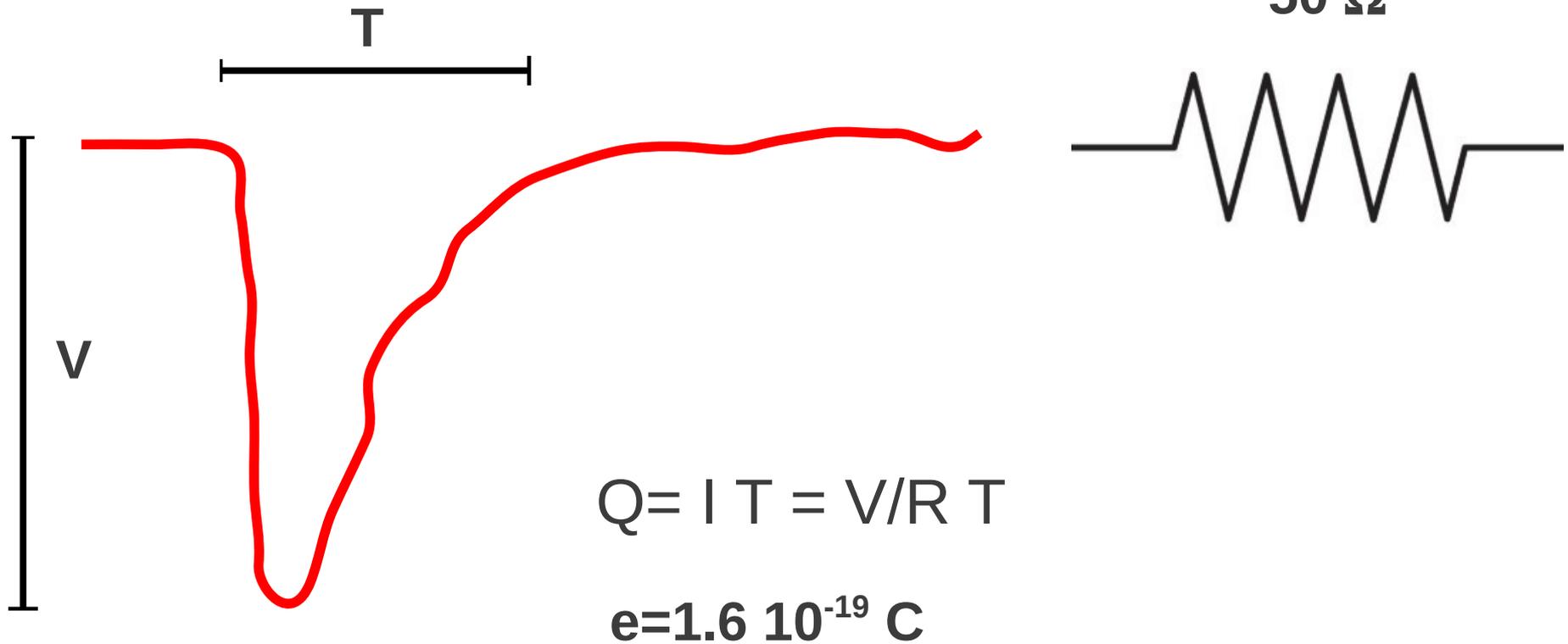
Qualche  $\mu s$  dopo ... e



# Osservazione dei segnali da scintillatori all'oscilloscopio



# CARICA RACCOLTA



Numero totale di elettroni:  $N_e = Q/e$

Quanti fotoni (fotoelettroni)  $N_{ph}$  ci aspettiamo?

A che fattore di amplificazione corrisponde  $N_e/N_{ph}$ ?

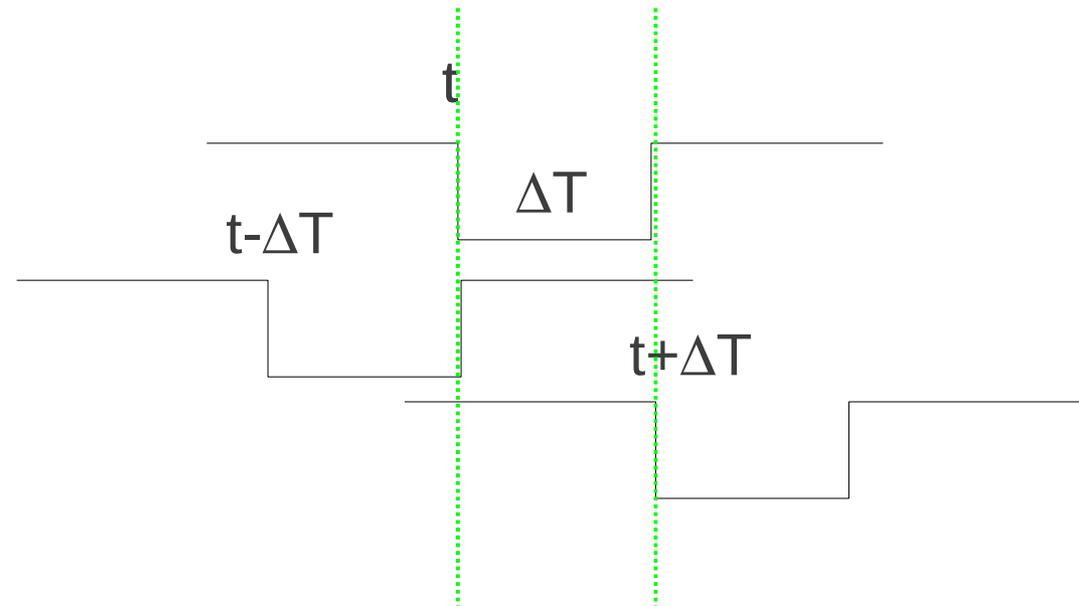
## Coincidenze accidentali

A causa di fluttuazioni termiche si hanno segnali spuri dai fototubi. Per questo i conteggi in singola sono maggiori delle coincidenze.

$$\nu_{\text{noise}} \sim 100 \text{ Hz}$$

$$\Delta T = 70 \text{ ns}$$

$$\nu_{\text{fake}} = \nu_{\text{noise}}^2 \cdot 2\Delta T = 1.4 \text{ mHz}$$

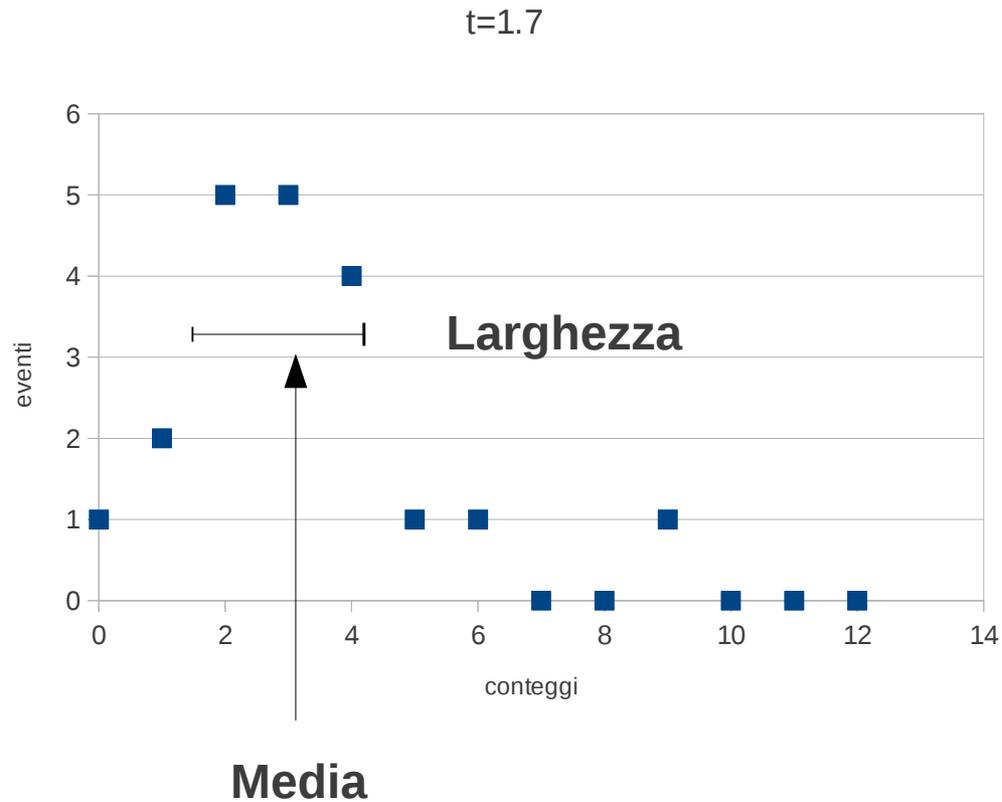


Se abbiamo coincidenze a circa 1 Hz allora **non possono essere dovute a eventi casuali di rumore elettrico!** La coincidenza ci garantisce che stiamo veramente contando il passaggio di particelle ionizzanti.

La rate di coincidenze torna con il numero di cosmici aspettati?

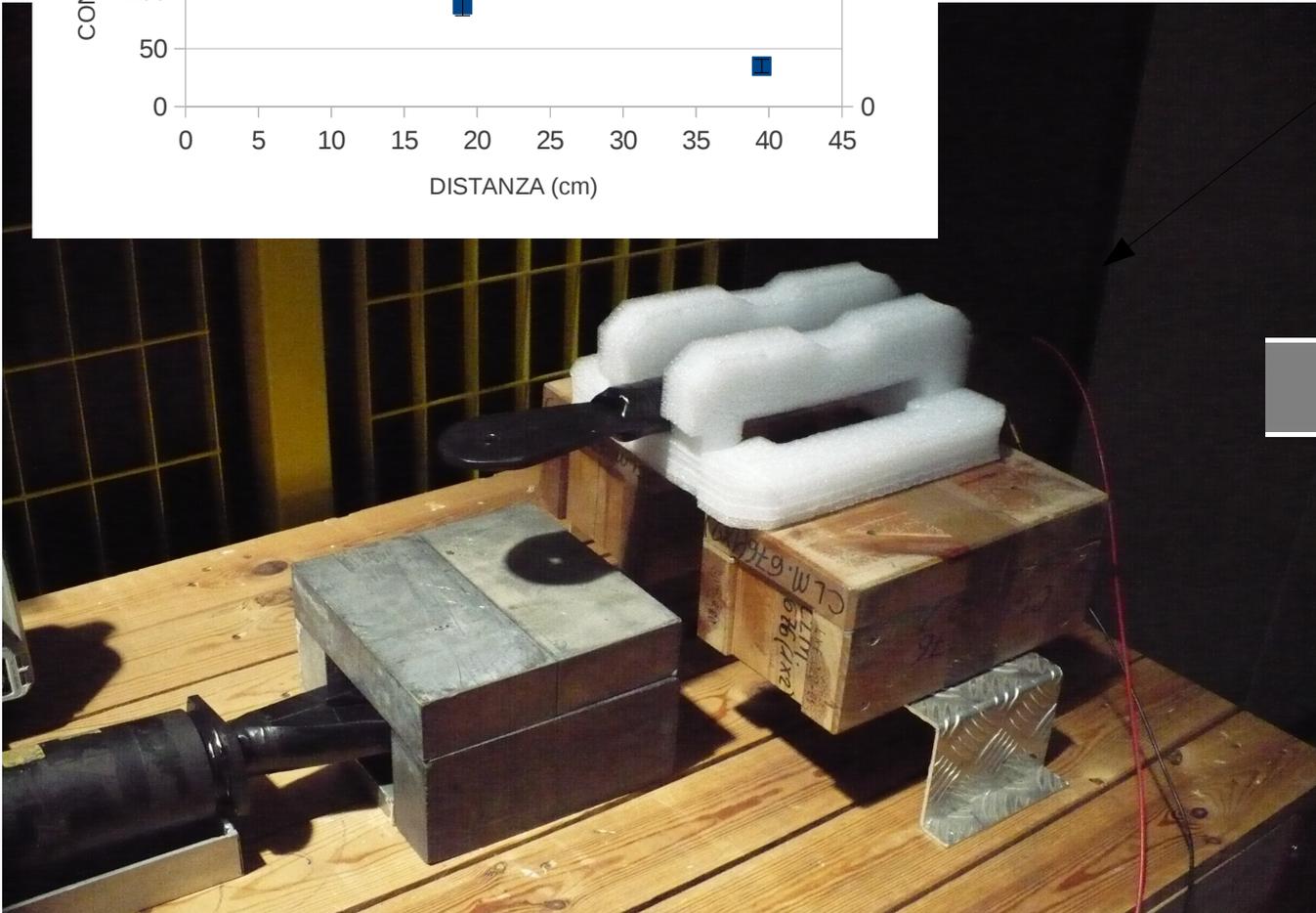
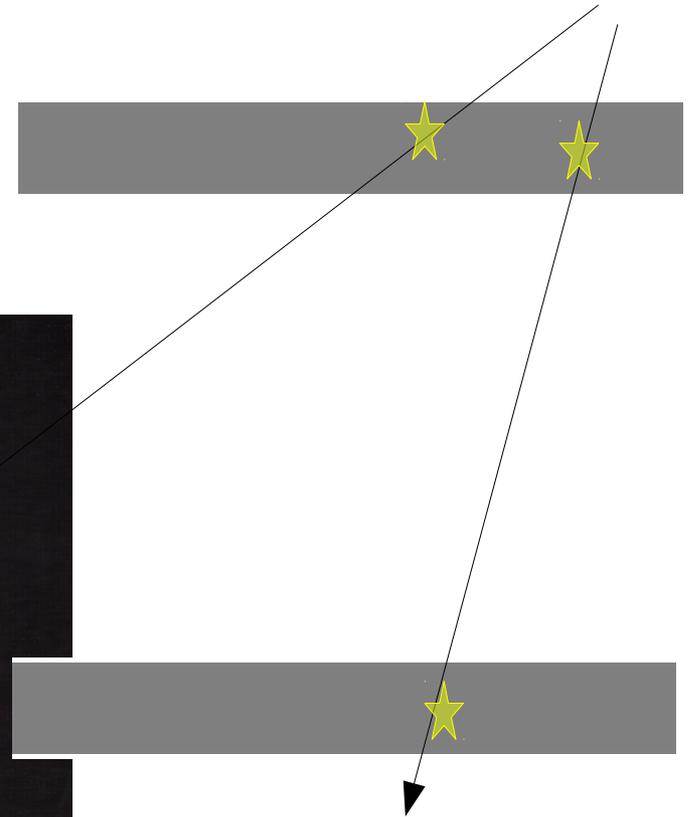
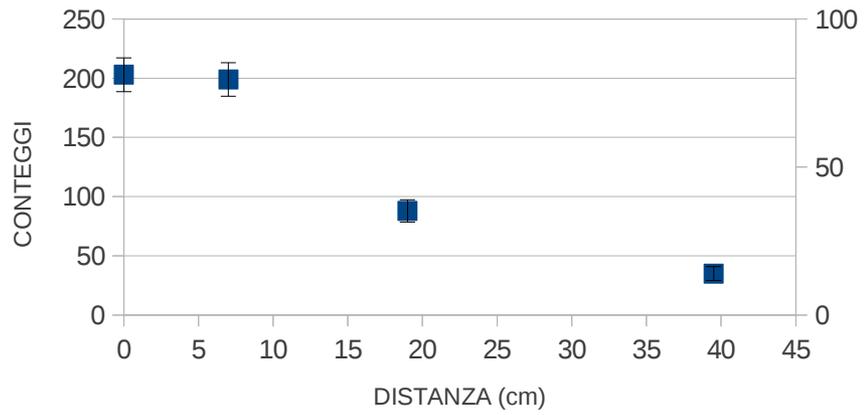
## STIMA DELL'ERRORE SUI CONTEGGI

Prendere una serie di conteggi per 10 s (20 o 30 misure) e fare la distribuzione con un foglio di calcolo. Verificare che la semi-larghezza è circa la radice quadrata del valor medio.

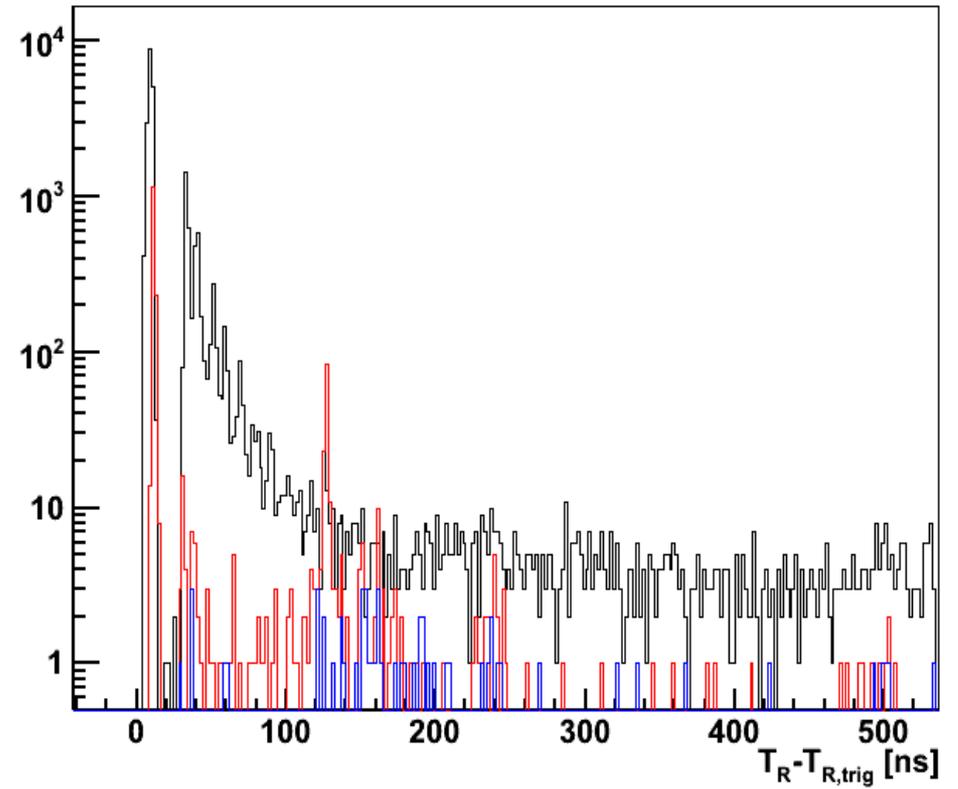
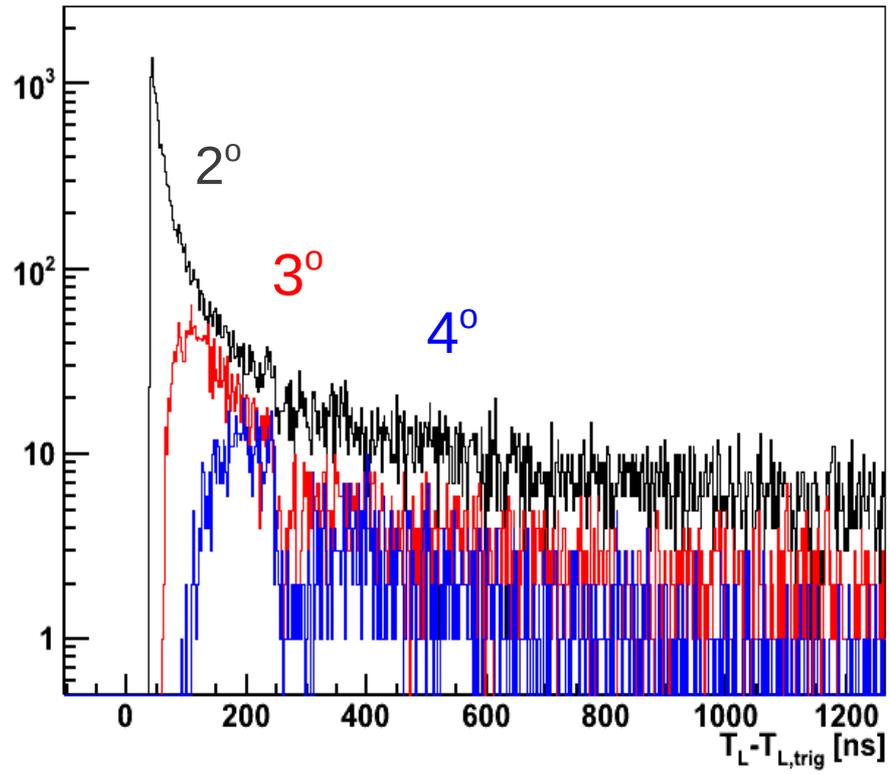


# ACCETTANZA GEOMETRICA

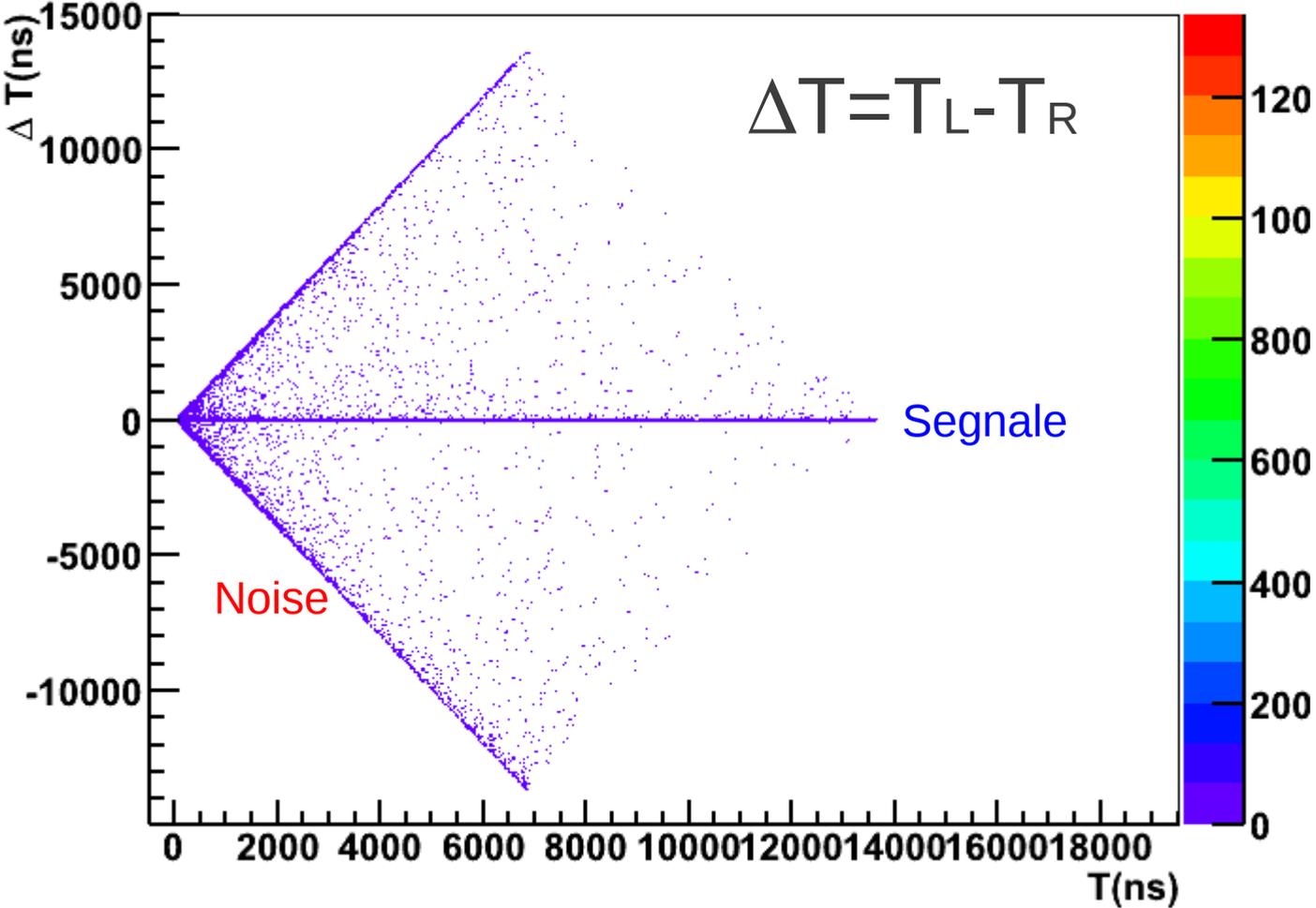
ACCETTANZA



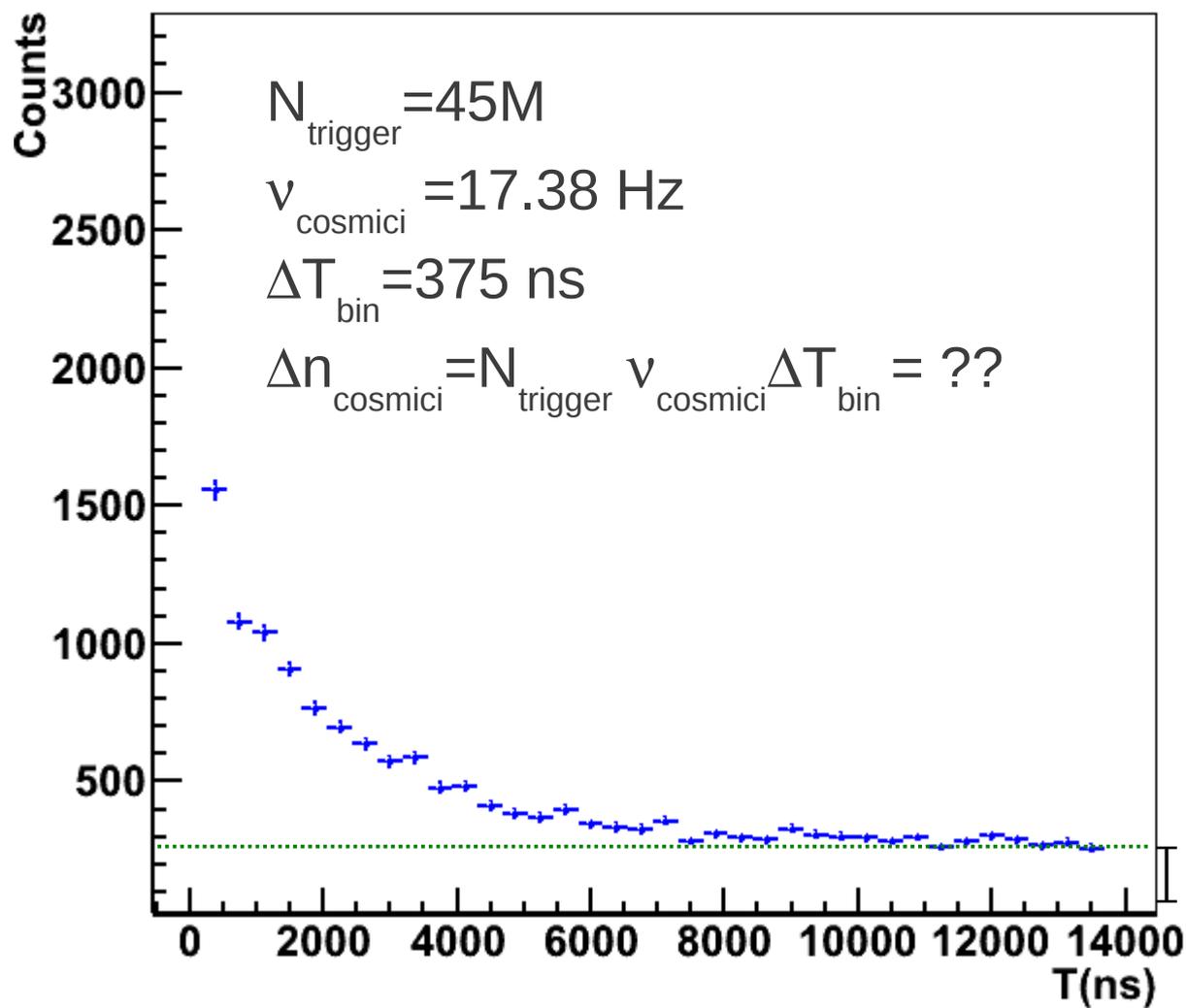
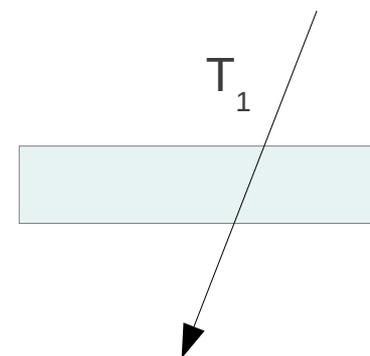
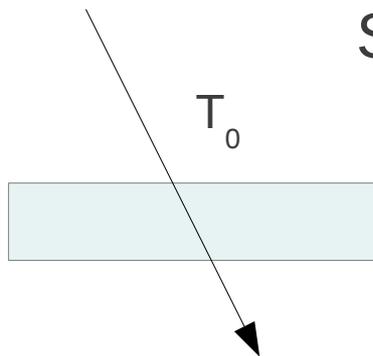
# Distribuzione conteggi



Correlazione  $\Delta T$  vs  $T$  per ogni possibile combinazione di hits secondari

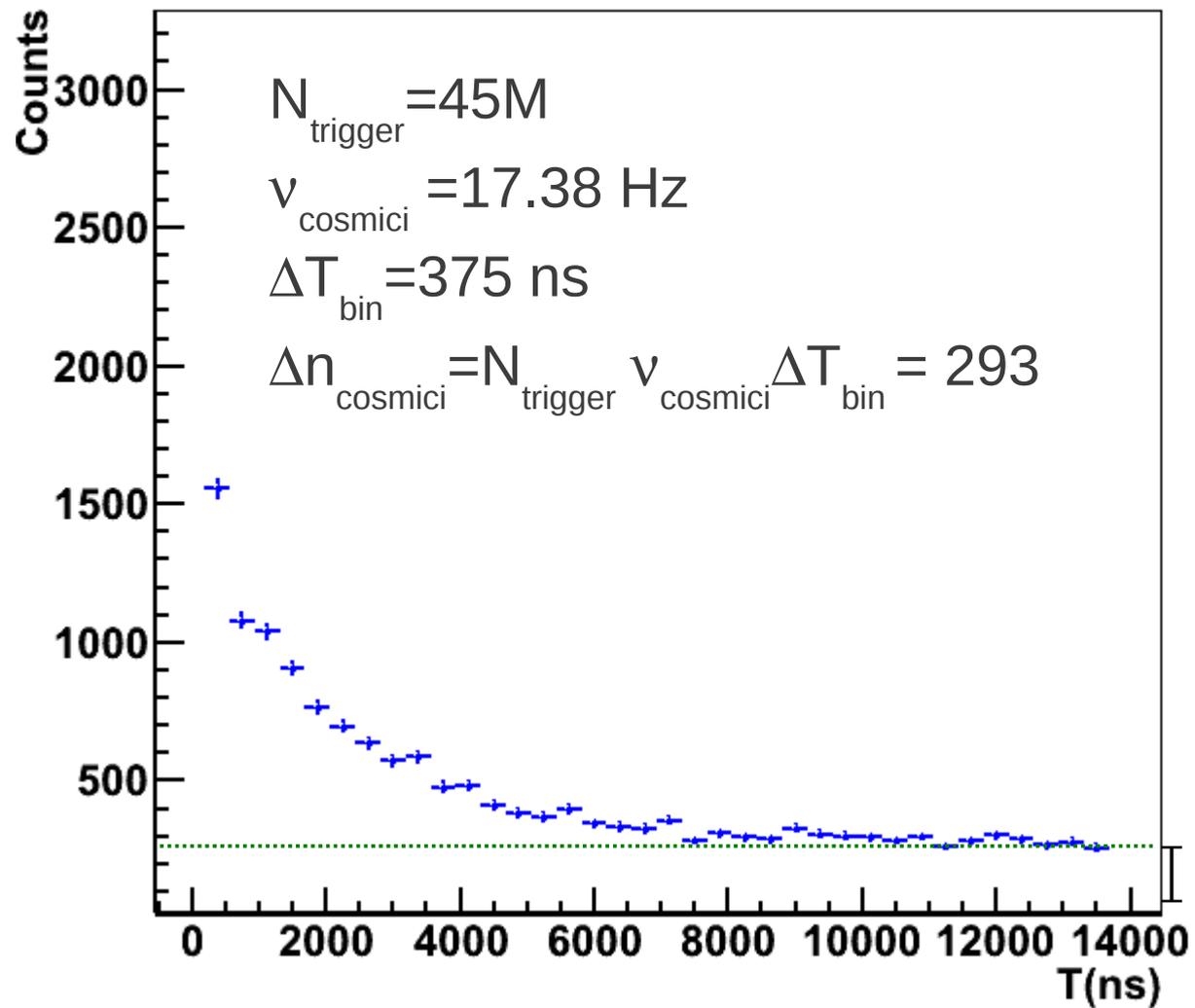
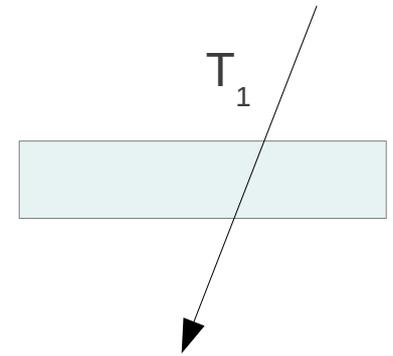
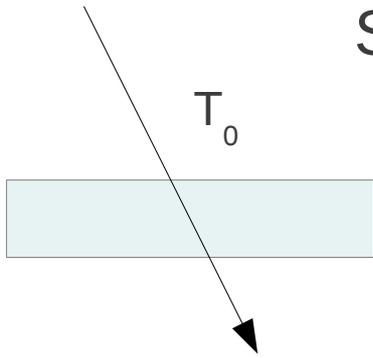


# Stima fondo da cosmici consecutivi



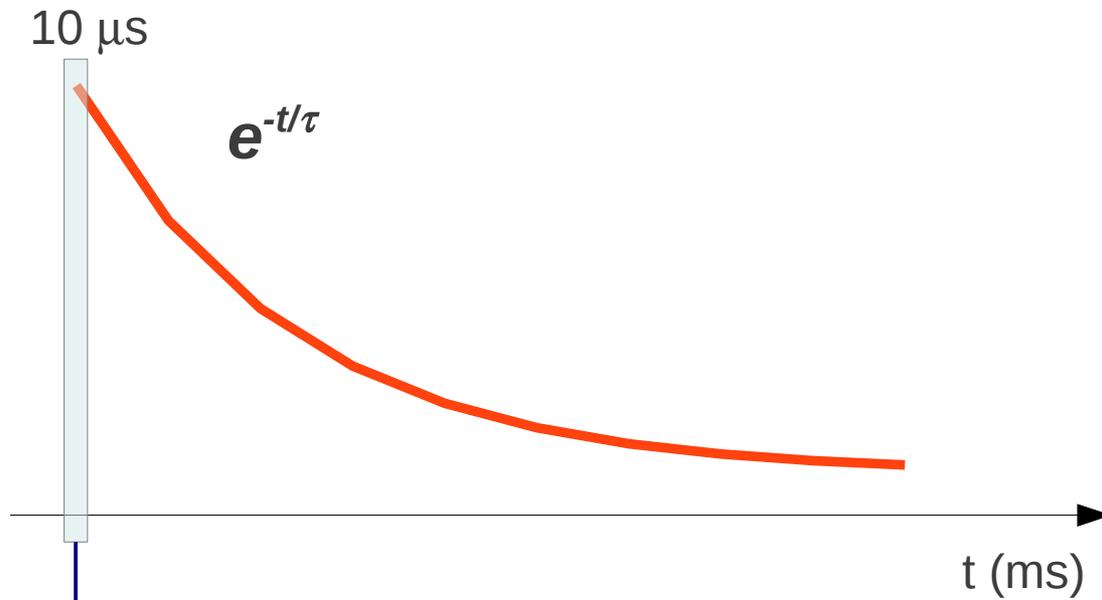
$\Delta N_{\text{cosmici}}$

# Stima fondo da cosmici consecutivi



$\Delta N_{\text{cosmici}}$

Tempo medio tra due cosmici  $\tau \sim 6$  ms



Alla scala dei  $\mu\text{s}$  è praticamente una costante

$t \text{ (\mu s)}$

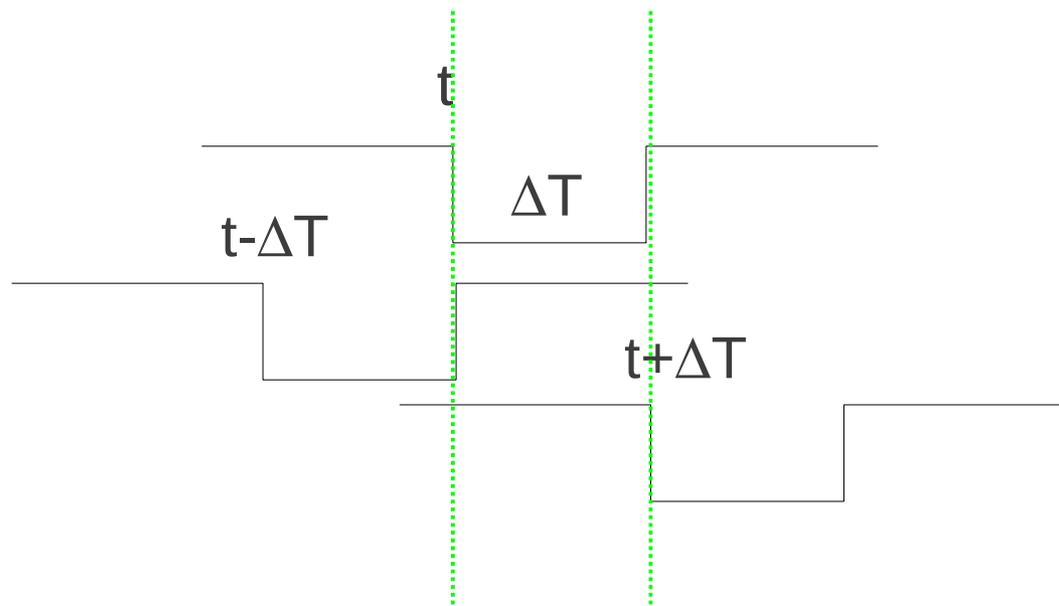
## Coincidenze accidentali

A causa di fluttuazioni termiche si hanno segnali spuri dai fototubi. Per questo i conteggi in singola sono maggiori delle coincidenze.

$$\nu_{\text{noise}} \sim 100 \text{ Hz}$$

$$\Delta T = 70 \text{ ns}$$

$$\nu_{\text{fake}} = \nu_{\text{noise}}^2 \cdot 2\Delta T = 1.4 \text{ mHz}$$

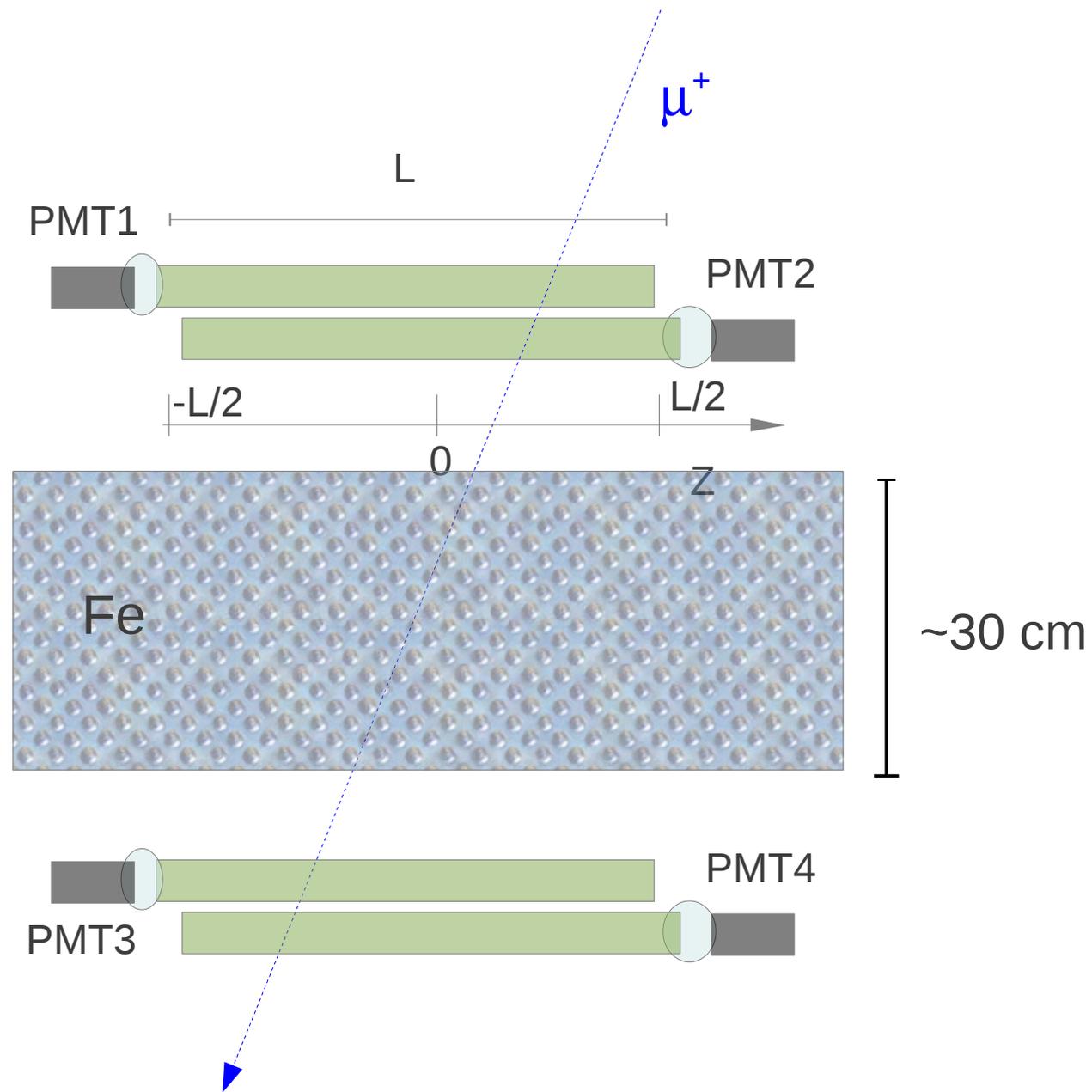


In un bin da 375 ns si ha quindi una probabilità:  $1.4 \times 10^{-3} \cdot 375 \times 10^{-9} = 5 \times 10^{-10}$

Su 45M eventi di trigger mi aspetto:

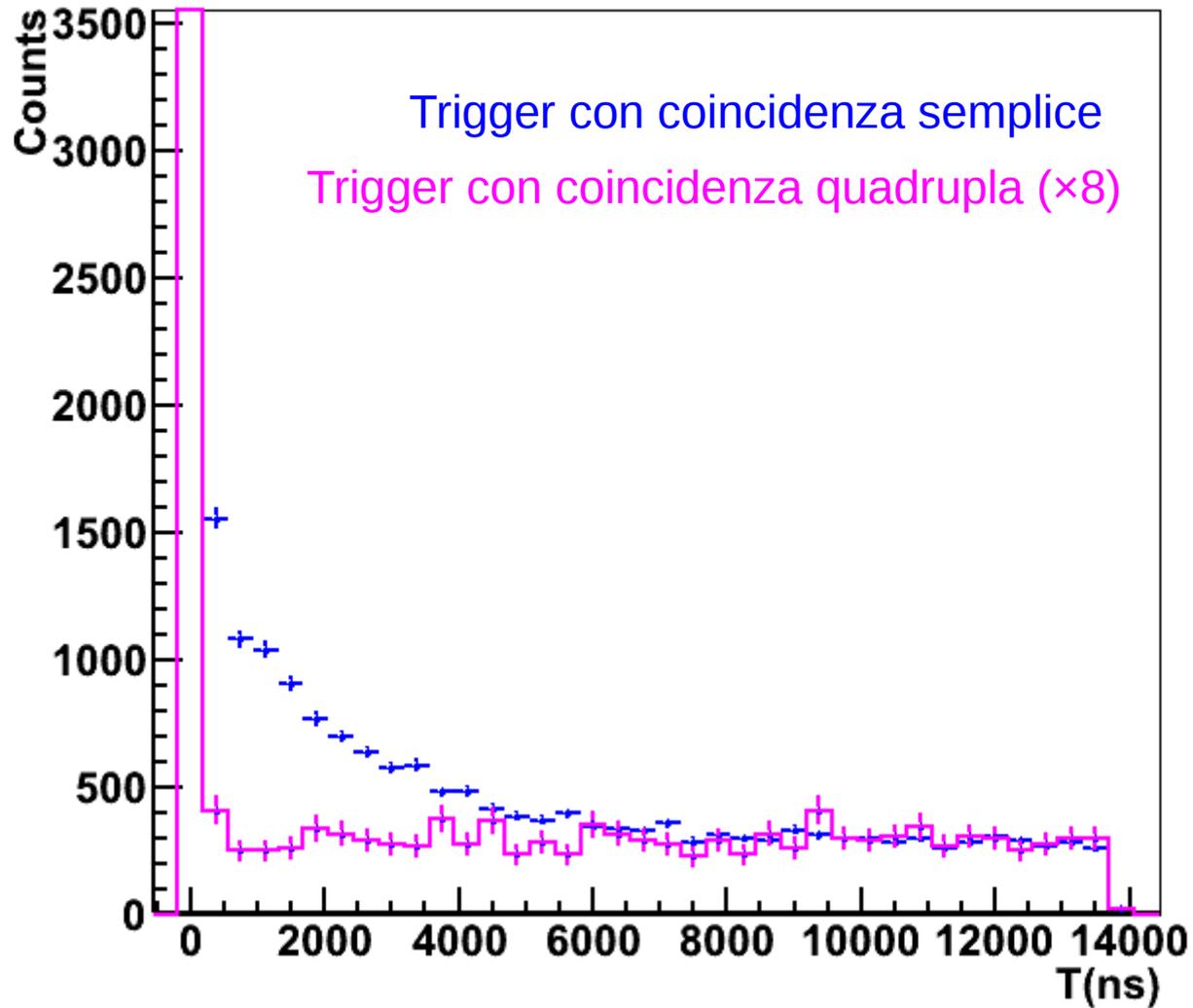
$$45\text{M} \times 5 \times 10^{-10} = 0.02 \text{ coincidenze fake per bin.}$$

# Coincidenze quaduple (ovvero muoni che non si fermano)

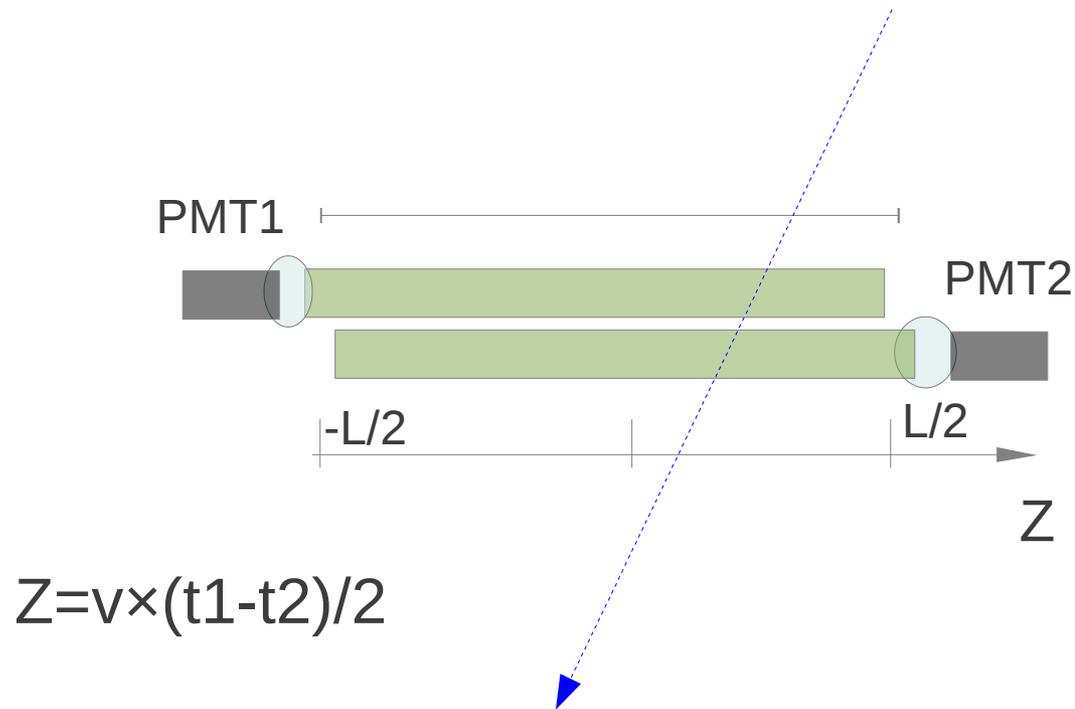


Il 10% (accettanza geometrica) dei cosmici che colpiscono i contatori 1 e 2 colpiscono anche quelli 3 e 4.

Trigger rinforzato con coincidenze quadruple per assicurarsi che il muone non si ferma nel ferro. Non devo vedere decadimenti del  $\mu$ .

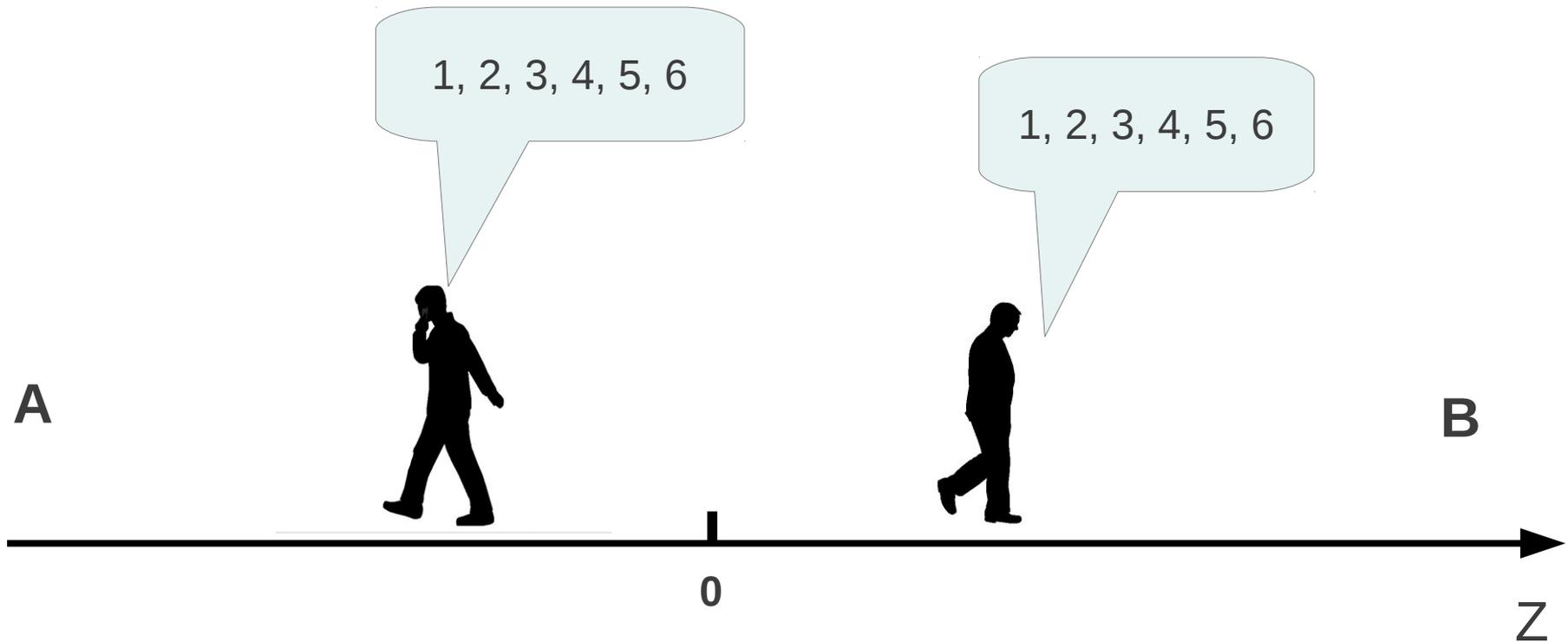


# Correlazioni in Z

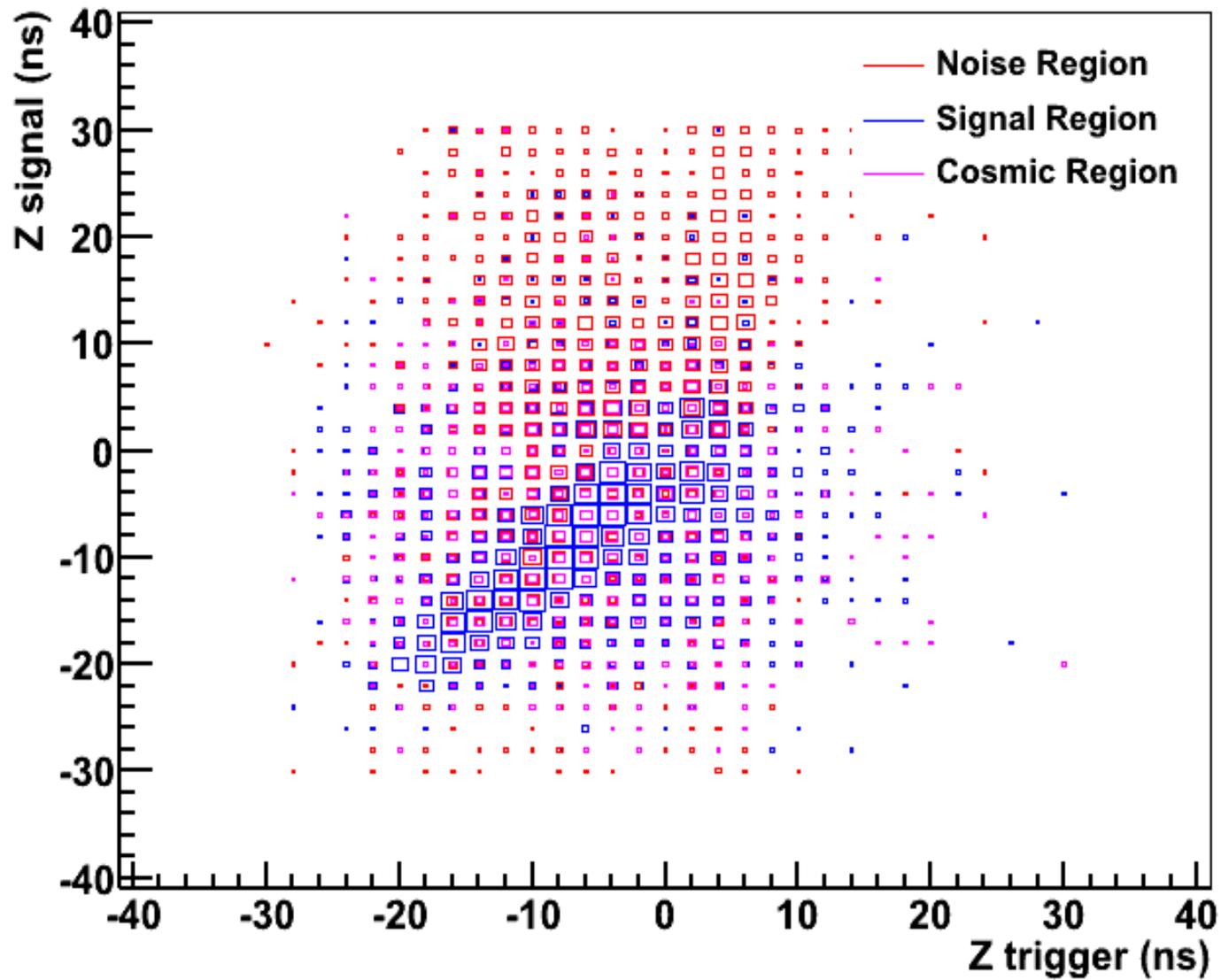


Dalla differenza dei tempi di propagazione della luce negli scintillatori possiamo calcolare la posizione in cui c'è stato il passaggio della particella ionizzante.

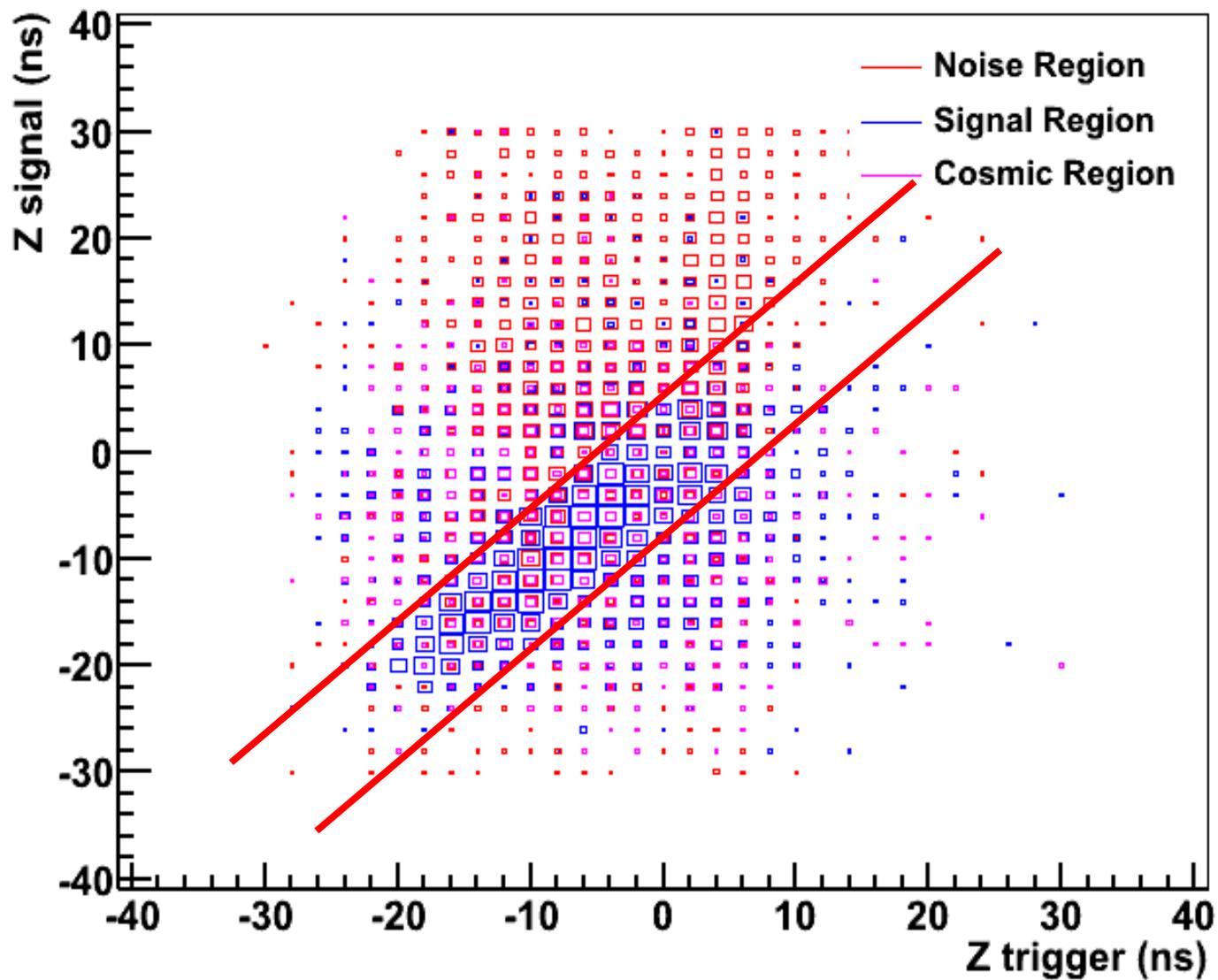
$$Z = (\text{Passi A} - \text{Passi B})/2 \times \text{lunghezza\_Passo}$$



# Correlazioni in Z

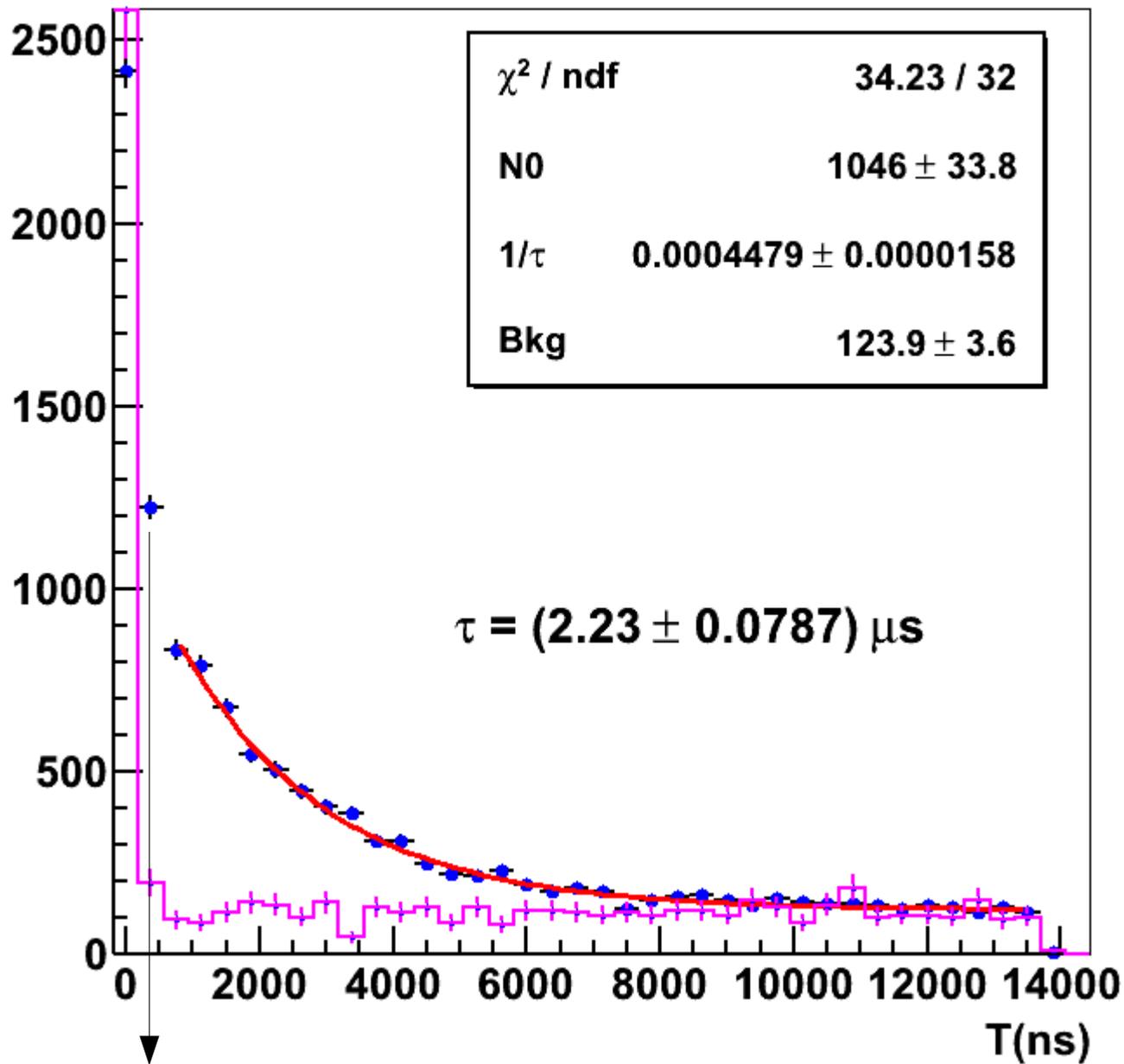


# Correlazioni in Z

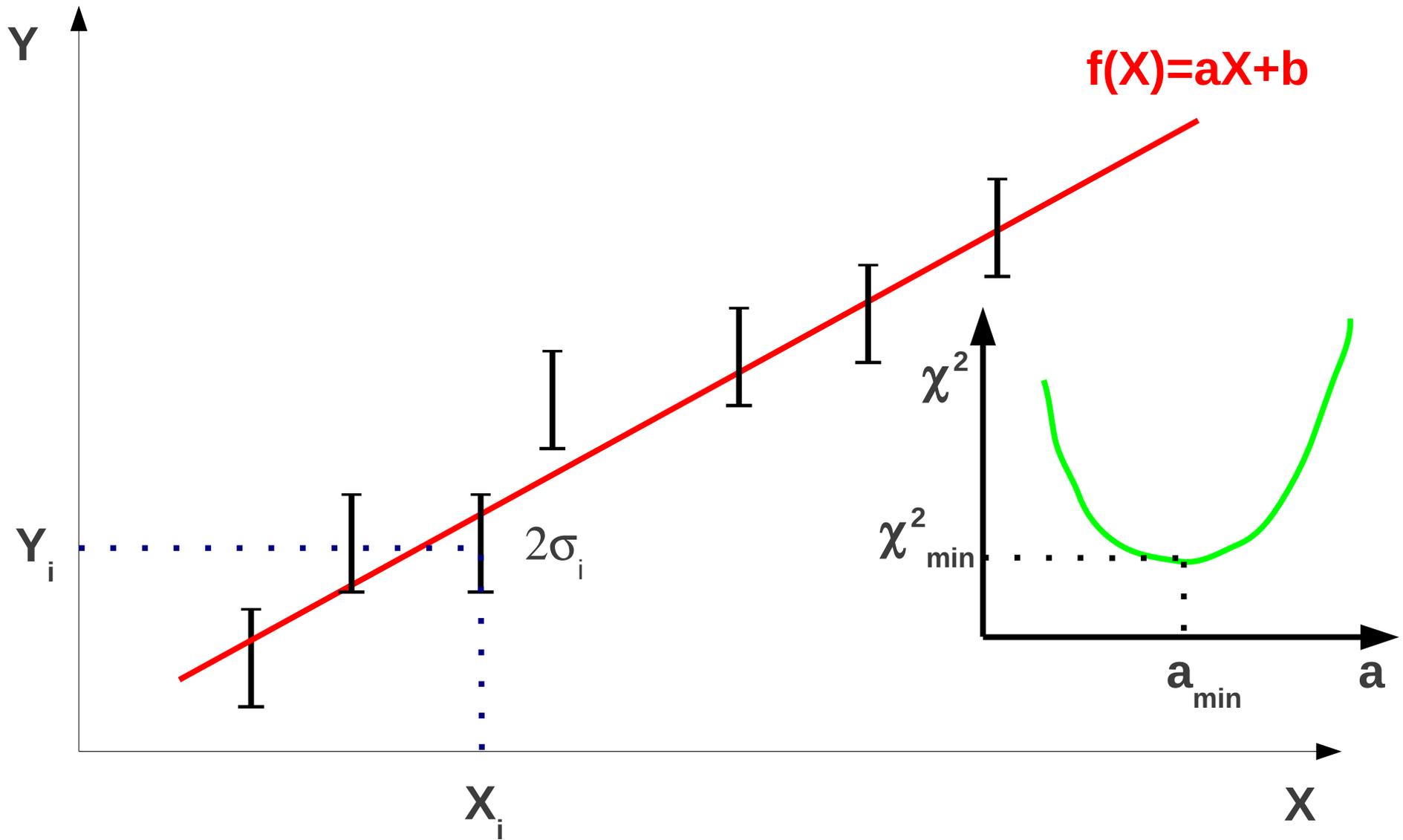


Seleziono eventi sulla bisettrice per rigettare cosmici e noise

# Fit con esponenziale + costante



Bin a 375 ns. Più alto a causa di noise correlato?



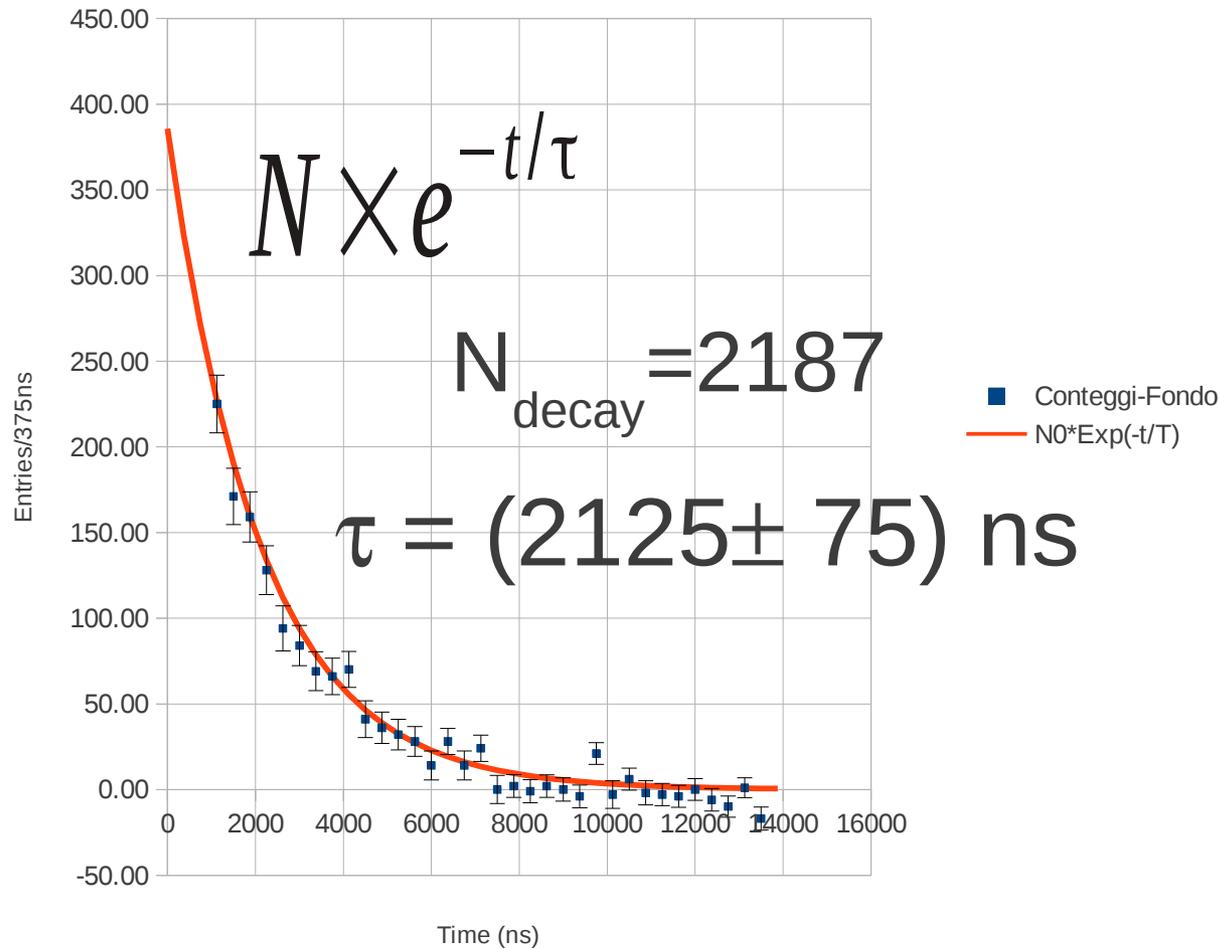
$$\chi^2 = \sum_i \left( \frac{Y_i - f(X_i)}{\sigma_i} \right)^2$$

# Risultato studenti stage estivo 2012

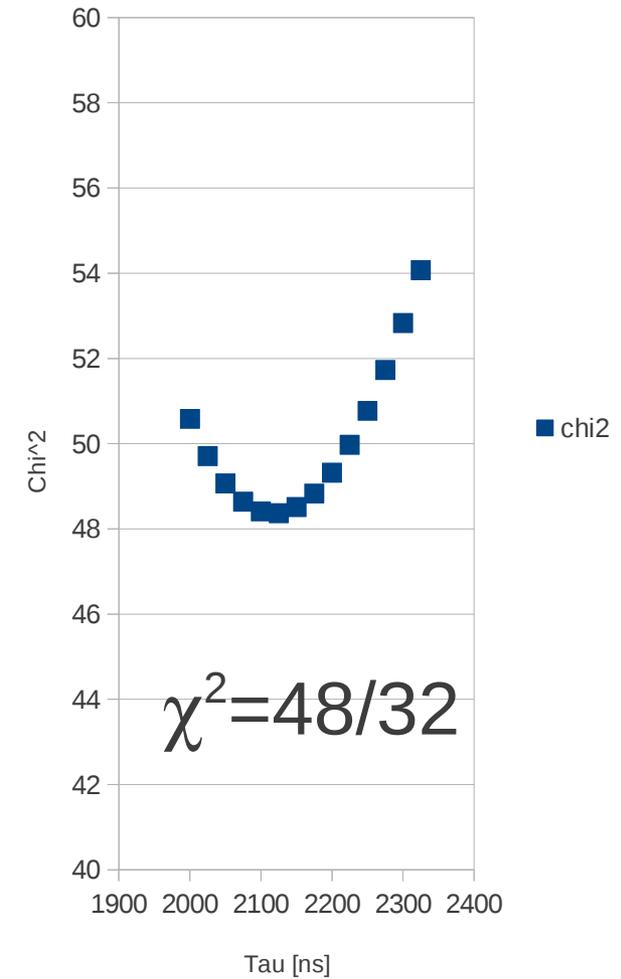
Campione di 15,5M, raccolto in 2 settimane

Ne

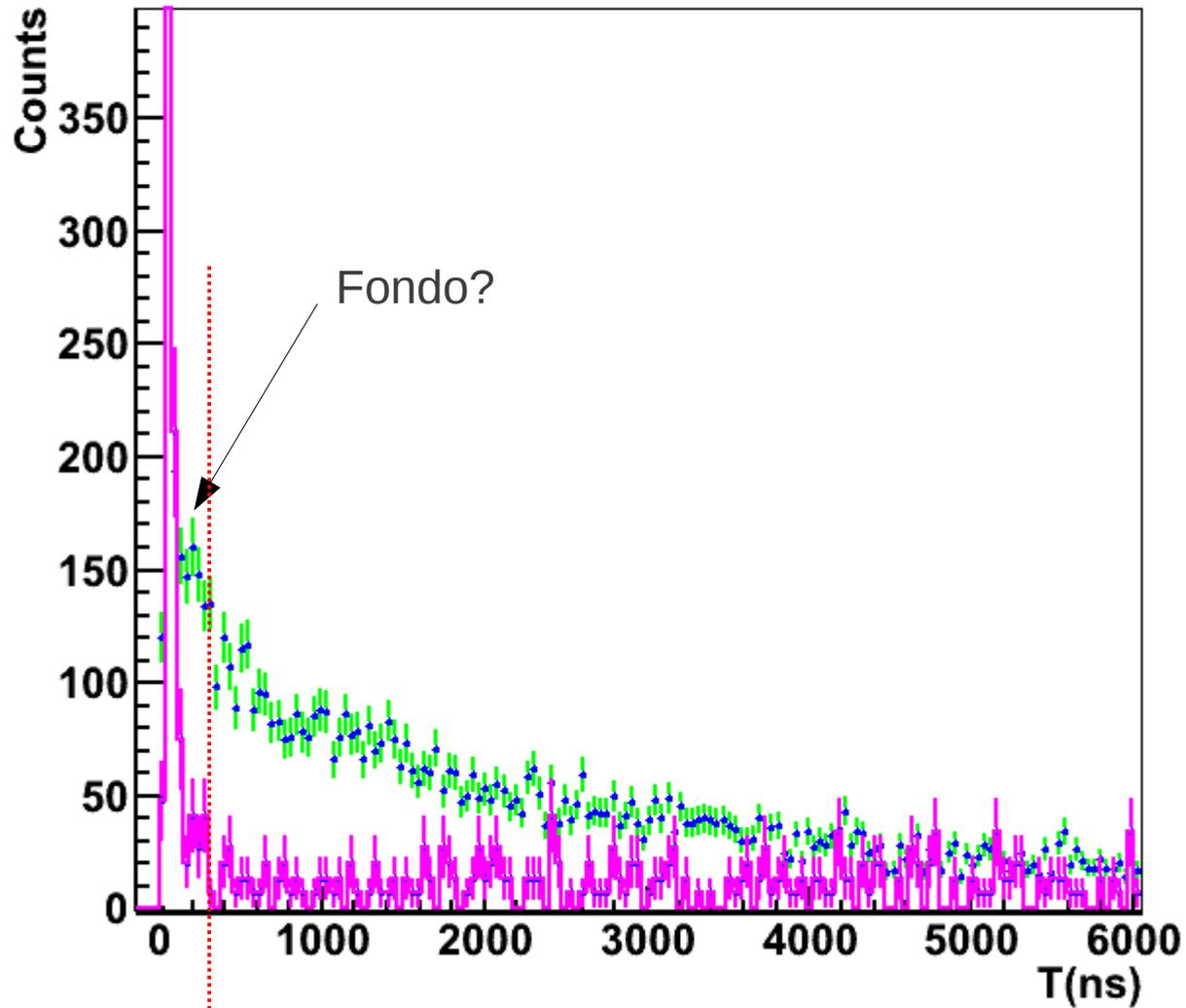
Lifetime Distribution



Chi<sup>2</sup> vs Tau



## Binning più fine (37.5 ns)



Noise correlato al massimo fino a 300 ns

Potrebbe anche essere il contributo del decadimento dei  $\mu^-$ .

