

# Misura del tempo medio di cattura nucleare di $\mu^-$ in Fe

G. Falsetti, L. Occhiuto, G. Tassone, M. Schioppa

# Sommario

- Motivazione della misura
- Apparato sperimentale e formazione del trigger
- Raccolta dati
- Analisi dei dati
- Valutazione dell'incertezza sul tempo medio di cattura nucleare
- Risultati
- Conclusioni

# Motivazione della misura

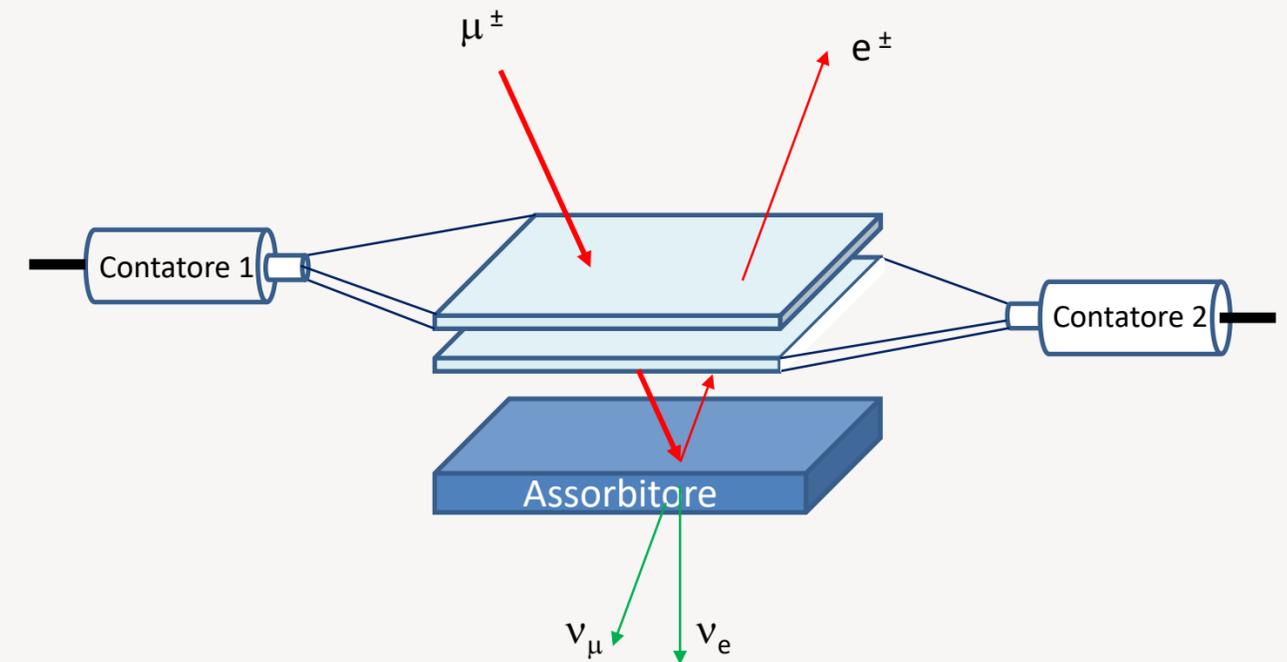
Far eseguire una misura del tempo medio di cattura nucleare del  $\mu^-$  in un atomo pesante come il Fe è un'occasione eccellente per:

- Mettere in pratica le nostre conoscenze di fisica atomica (modello atomico, quantizzazione delle orbite, delocalizzazione delle particelle lungo le orbite, ...);
- Introdurre l'universo sub-nucleare attraverso un fenomeno naturale che investe la nostra atmosfera in ogni istante: *i raggi cosmici*;
- Raccogliere dati con una strumentazione nucleare spesso presente nei laboratori universitari e dei centri di ricerca;
- Estrarre dai dati raccolti vari contributi tra cui il tempo di vita medio del  $\mu^+$ ,  $\mu^-$  in Fe e la frequenza dei raggi cosmici secondari (la funzione esponenziale come distribuzione di probabilità del ritardo tra due eventi casuali consecutivi);
- Calcolare il tempo medio di cattura nucleare e confrontarlo con i dati in letteratura e con un modello semplificato.

# Apparato sperimentale e formazione del trigger

L'apparato impiegato si compone di:

- due contatori a scintillazione;
- un assorbitore (Fe);
- un'elettronica di trigger per selezionare solo gli eventi con due segnali di coincidenza in una finestra temporale di circa  $20\mu\text{s}$ ;
- di un oscilloscopio digitale per la misura e l'acquisizione del tempo di decadimento.



# Raccolta dati

Per studiare il decadimento dei  $\mu$  è sufficiente considerare solo quei muoni che arrivano nell'apparato sperimentale con un'energia appena sufficiente per attraversare una coppia di contatori a scintillazione. Basterà inserire sotto questa coppia un assorbitore per completare la termalizzazione del muone, processo che ha avuto inizio nell'atmosfera subito dopo la sua creazione.

---

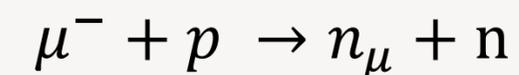
Il tempo di vita medio di un muone libero è  $\tau = 2,1969811 \pm 0.0000022 \mu\text{s}$  [\*]

ma nella materia il  $\mu^+$  ed il  $\mu^-$  assumono  $\tau$  diversi. Questa differenza è legata al modo in cui interagiscono con la materia.

[\*] K. Nakamura et al. ([Particle Data Group](http://pdg.lbl.gov)), J. Phys. G 37, 075021 (2010), URL: <http://pdg.lbl.gov>

Il muone **positivo** ha un'alta probabilità di catturare un elettrone del materiale formando uno stato legato chiamato *muonio* e decadere come se fosse libero

Il muone **negativo** può legarsi ad un atomo dell'assorbitore formando un *atomo mesico* la cui orbita ha raggio circa 200 volte inferiore a quello dell'elettrone più interno. Qui può decadere in stato legato o essere catturato dal nucleo e dare luogo ad una interazione debole con uno dei protoni del nucleo trasformandolo in neutrone secondo la reazione



Inoltre il suo tempo di vita media sarà più breve del decadimento libero per le seguenti ragioni

- La riduzione dello spazio delle fasi accessibile ai prodotti di decadimento;
- La dilatazione temporale del muone, che si muove relativisticamente intorno al nucleo;
- L'effetto del potenziale elettrostatico  $V(r)$  del nucleo.

# Raccolta dati

Il trigger dell'esperimento seleziona solo eventi in cui, in una finestra temporale di circa  $19\mu\text{s}$ , sono presenti due segnali di coincidenza prodotti dai due contatori a scintillazione che sormontano l'assorbitore. Il segnale di trigger avvia l'acquisizione del tempo che intercorre tra le due coincidenze e la sua memorizzazione in un file di testo di tipo Comma Separated Values. Questi tempi  $\Delta t$ , vengono riportati in un istogramma.

I dati sono stati acquisiti ininterrottamente nel periodo che va da agosto a novembre 2020 e contengono due popolazioni:

1. Una componente di segnale dovuta al muone e al suo elettrone di decadimento nella sua finestra di acquisizione;
2. Una seconda componente di fondo dovuta a due muoni che attraversano i contatori a scintillazione nella finestra di acquisizione.

La funzione di probabilità che le rappresenta è quella esponenziale, come atteso per le variabili casuali uniformemente distribuite di cui si è interessati solo al ritardo tra due eventi successivi.

# Analisi dei dati

La distribuzione che si osserva è la combinazione lineare di 3 funzioni esponenziali, ognuna delle quali ha un suo tempo caratteristico e copre regioni dello spettro  $\Delta t$  di diversa estensione.

- 1. Eventi dovuti al decadimento dei muoni negativi nella materia;  $\longrightarrow$  Si collocano nell'intervallo  $(0 ; 10 \cdot \tau_{\text{tot}})$ ,
- 2. Eventi dovuti al decadimento dei muoni positivi nella materia;  $\longrightarrow$  Si collocano nell'intervallo  $(0 ; 10 \cdot \tau_{\mu+})$  ;
- 3. Eventi dovuti al fondo di accidentali.  $\longrightarrow$  Si collocano in tutta la finestra temporale di acquisizione.

# Analisi dei dati

1. Per prima cosa è stato effettuato il fit del fondo di eventi accidentali con la funzione

$$f_{bkg}(t) = e^{\Gamma_{bkg}t + C_0}$$

nella regione dello spettro in cui questi eventi sono prevalenti ( $\geq 16\mu\text{s}$ ).

2. Dopo di che è stato eseguito il fit degli eventi dovuti al decadimento del  $\mu^+$  con la funzione

$$f_{\mu^+}(t) = e^{\Gamma_{\mu^+}t + C_1} + f_{bkg}(t)$$

per tutti i tempi  $\geq 10 \cdot \tau_{\mu^-}$ , fissando i parametri della funzione  $f_{bkg}(t)$  al valore del primo fit.

3. Infine è stato realizzato il fit di tutti i dati presenti nello spettro con la funzione

$$f_{\mu^-}(t) = e^{\Gamma_{\mu^-}t + C_2} + f_{\mu^+}(t)$$

fissando i parametri della funzione  $f_{\mu^+}(t)$  ai valori del secondo fit.

# Valutazione dell'incertezza sul tempo medio di cattura nucleare

Il parametro  $\Gamma$  della funzione esponenziale che caratterizza il decadimento del  $\mu^-$  in Fe è stato ricavato dal fit e da questo, facendone l'inverso, il relativo tempo di decadimento  $\tau$ .

Il parametro è soggetto ad un *errore sistematico* legato a:

- alla scelta degli intervalli di fit ;
- all'ipotesi che i decadimenti del  $\mu^-$  in elementi leggeri come il carbonio dello scintillatore a contatto con l'assorbitore siano trascurabili.

Per valutarlo è stato scritto un *toy Monte Carlo* in cui vengono simulati i tre contributi separatamente e poi combinati linearmente con peso unitario. Così è stato possibile:

- visualizzare separatamente le funzioni relative a:
  - Decadimento del muone negativo
  - Decadimento del muone positivo
  - Fondo di accidentali

-valutare l'influenza degli intervalli di tempo scelti per eseguire i fit, sulla determinazione del tempo di vita medio del muone negativo.

# Risultati

Il valore noto in letteratura per il tempo di vita medio del  $\mu^-$  in ferro è  $\tau_{\mu^-} = 206.0 \pm 1.0 \text{ ns}$

- Intervallo (0.2 ; 18.5) $\mu\text{s}$
- Bins di larghezza 50 ns
- Il fit degli eventi accidentali è stato eseguito con una funzione esponenziale nell'intervallo (16; 18.5) $\mu\text{s}$ .
- Il fit degli eventi dovuti al decadimento del muone positivo è stato eseguito con la funzione

$$f_{fe}(t) = e^{\Gamma_{\mu^+} t + C_1} + f_{bkg}(t)$$

nell'intervallo (2 ; 18.5) $\mu\text{s}$  dopo aver fissato i parametri del fondo ai valori del fit precedente.

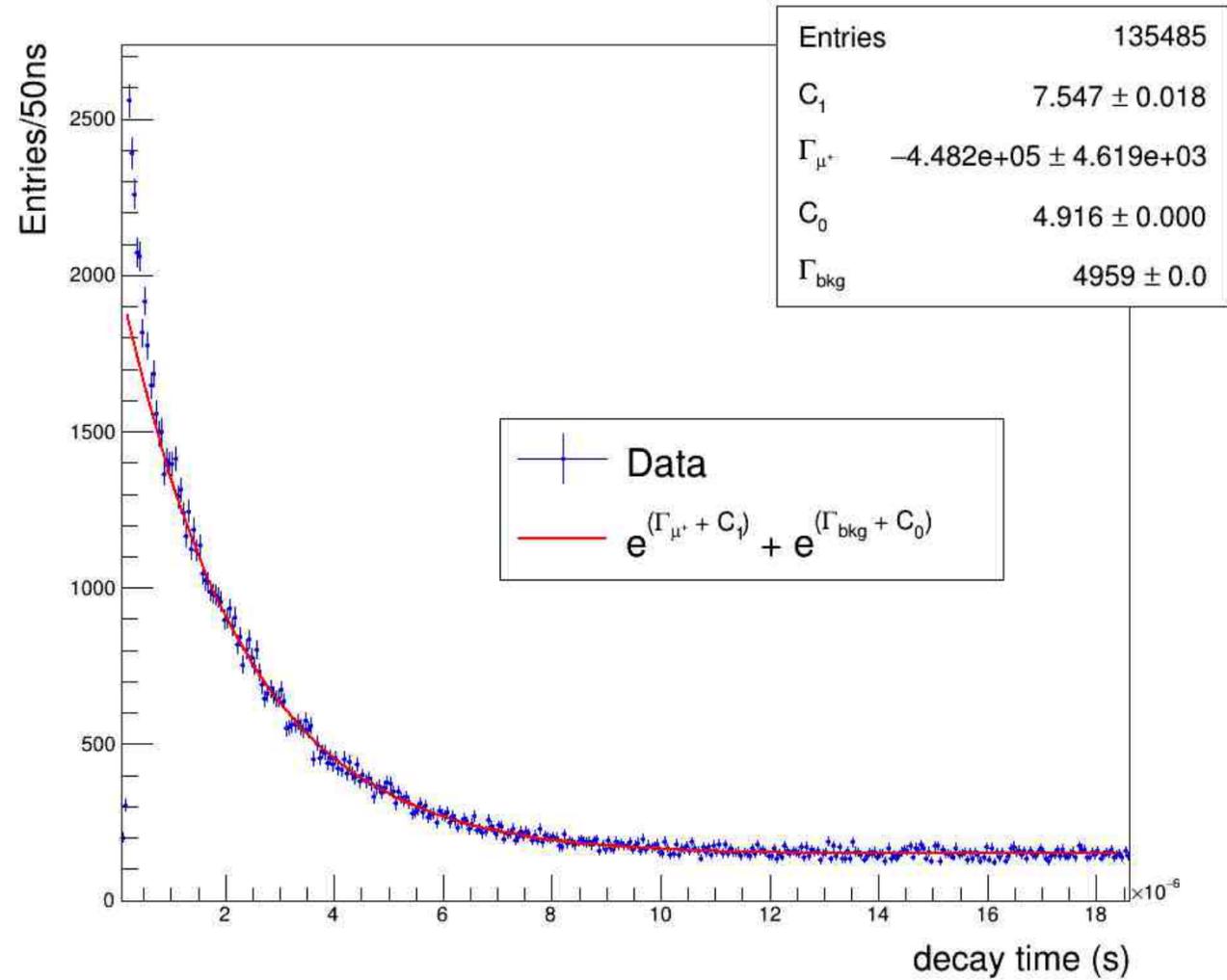
- Il fit degli eventi dovuti al decadimento del muone negativo in stato legato è stato eseguito con la funzione somma di tre esponenziali in cui tutti i parametri di  $f_{fe}(t)$  sono stati fissati ai valori ottenuti nei due precedenti fit.

I risultati ottenuti per il parametro e per il tempo di vita medio sono:

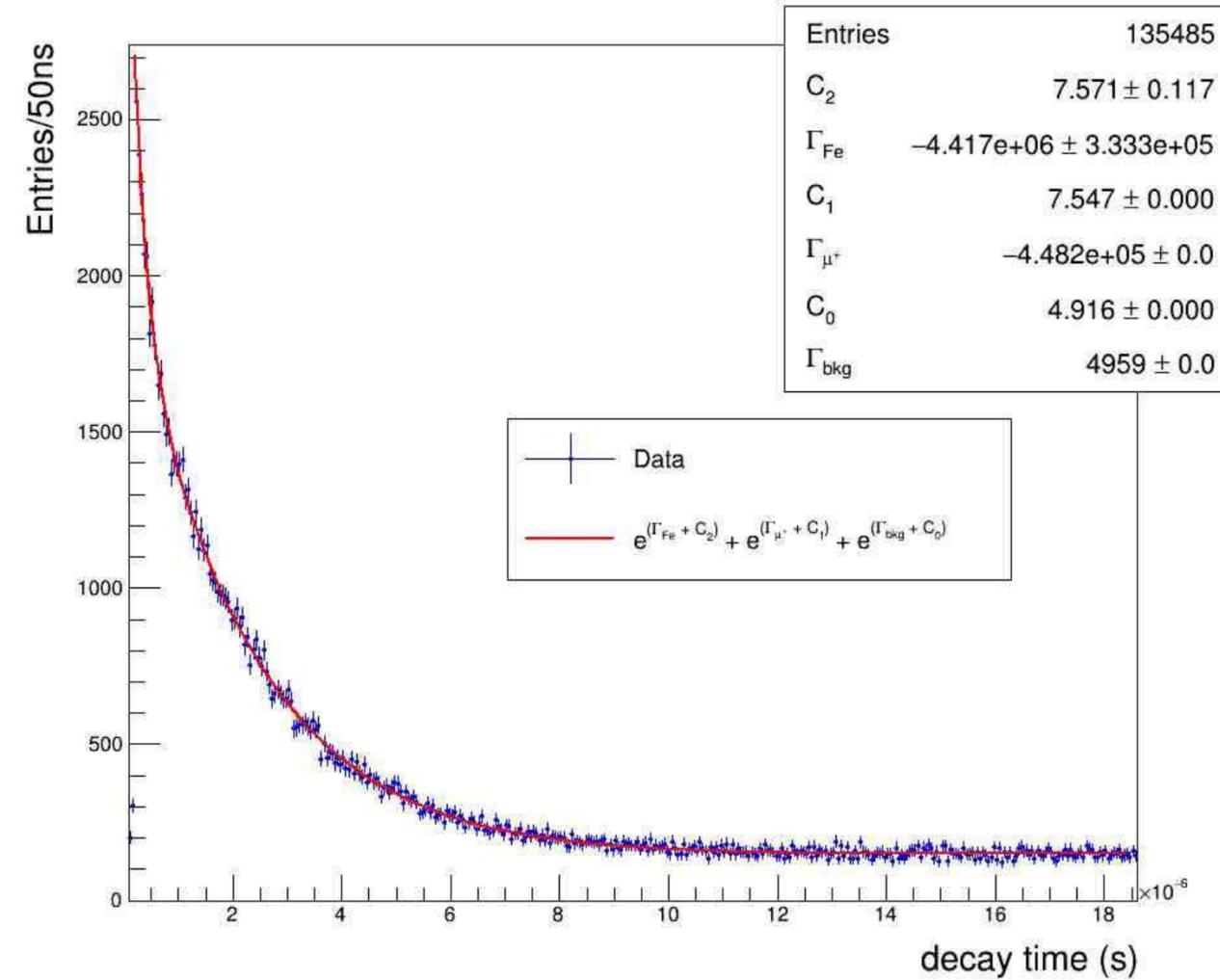
$$\Gamma_{Fe} = (44.2 \pm 3.3 \pm 4.6) \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau_{Fe} = (226 \pm 17.1 \pm 23.5) \text{ ns}$$

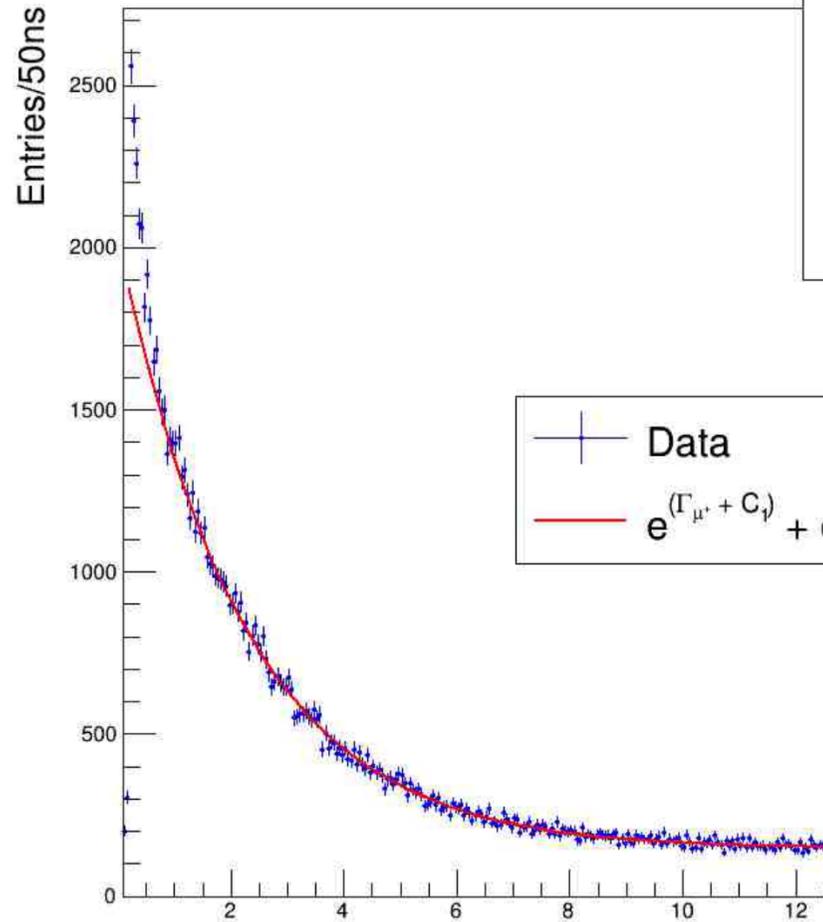
### muon decay



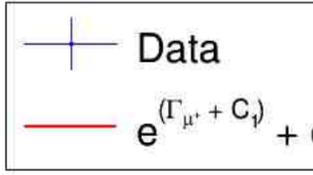
### muon decay



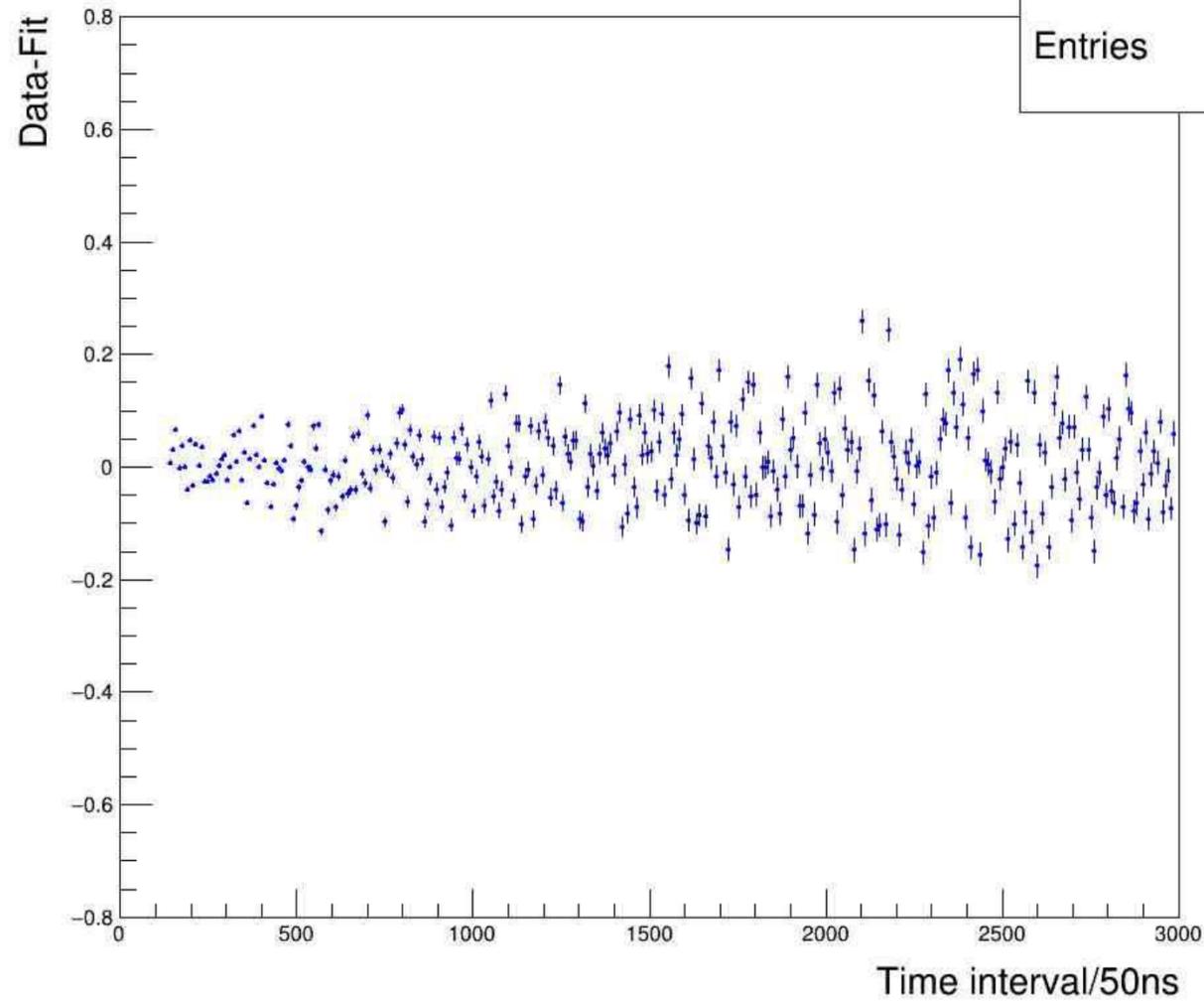
### muon decay



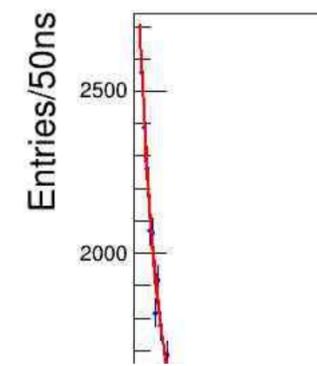
Entries	135485
$C_1$	$7.547 \pm 0.018$
$\Gamma_{\mu^+}$	$-4.482e+05 \pm 4.619e+03$
$C_0$	$4.916 \pm 0.000$
$\Gamma_{\text{bkg}}$	$4959 \pm 0.0$



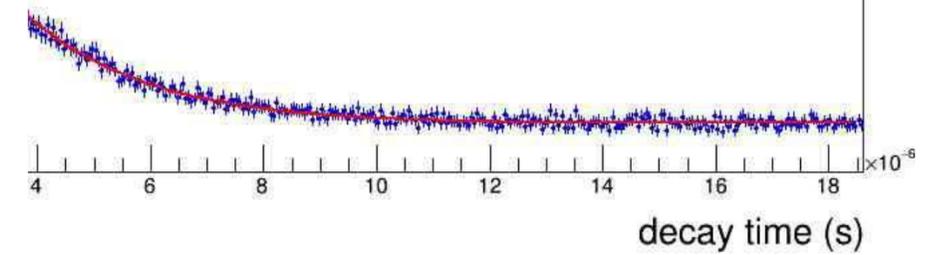
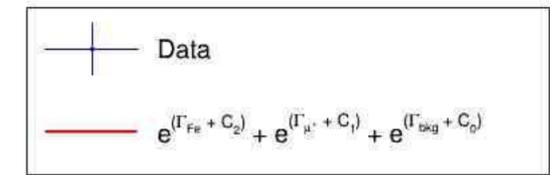
### residuals1



### muon decay



Entries	135485
$C_2$	$7.571 \pm 0.117$
$\Gamma_{\text{Fe}}$	$-4.417e+06 \pm 3.333e+05$
$C_1$	$7.547 \pm 0.000$
$\Gamma_{\mu^+}$	$-4.482e+05 \pm 0.0$
$C_0$	$4.916 \pm 0.000$
$\Gamma_{\text{bkg}}$	$4959 \pm 0.0$



# Risultati

- Dal valore di  $\tau_{\mu^+}$  è possibile estrarre il valore della costante di Fermi:

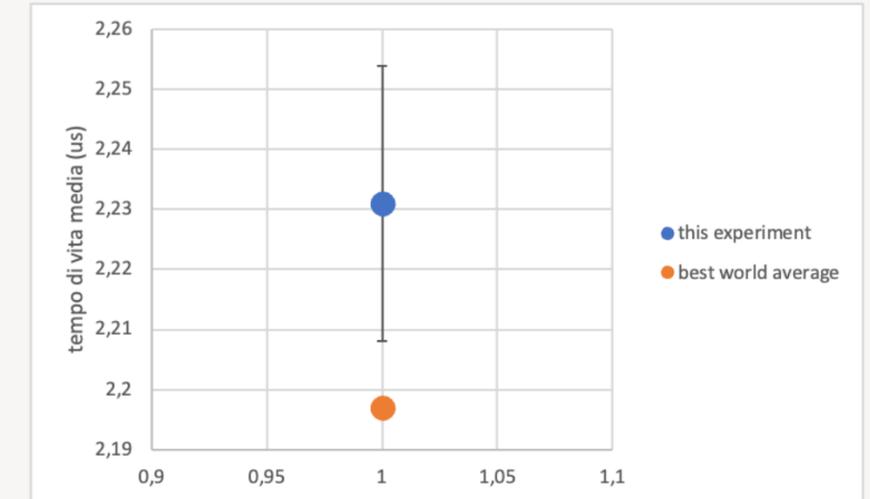
$$\Gamma_{\mu^+} = (4.482 \pm 0.046) \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau_{\mu^+} = (2.231 \pm 0.023) \text{ } \mu\text{s}$$

$$G_F = \sqrt{\frac{192 \pi^3 \hbar}{m_{\mu}^5 \tau_{\mu}}} = \sqrt{\frac{192 \pi^3 (6.582122 \cdot 10^{-25})}{(0.1056584)^5 (2.231 \cdot 10^{-6})}} = 1.15491 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

- L'errore statistico su  $G_F$  e'  $\sigma_{G_F} = G_F \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\tau_{\mu^+}}}{\tau_{\mu^+}} = G_F \cdot 0.5 \cdot 0.023/2.231 = G_F \cdot 0.0052$

- Dal valore di  $\tau_{\mu^-}$  è possibile studiare gli effetti del potenziale coulombiano del nucleo sulla vita media.



# Risultati

Dalla nota relazione:

$$\Gamma_{tot} = \Gamma_c + \Gamma_d$$

Da cui segue:

$$\frac{1}{\tau_{tot}} = \frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau_d}$$

E' possibile estrarre il *tempo medio di cattura* considerando  $\tau_d$  come il tempo di vita medio del muone libero, senza tener conto degli effetti relativistici e del potenziale elettrostatico del nucleo:

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_{tot}} - \frac{1}{\tau_d} = 39,718 \pm 3,346 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$



$$\tau_c = (251.8 \pm 21.2) \text{ ns}$$

# Conclusioni

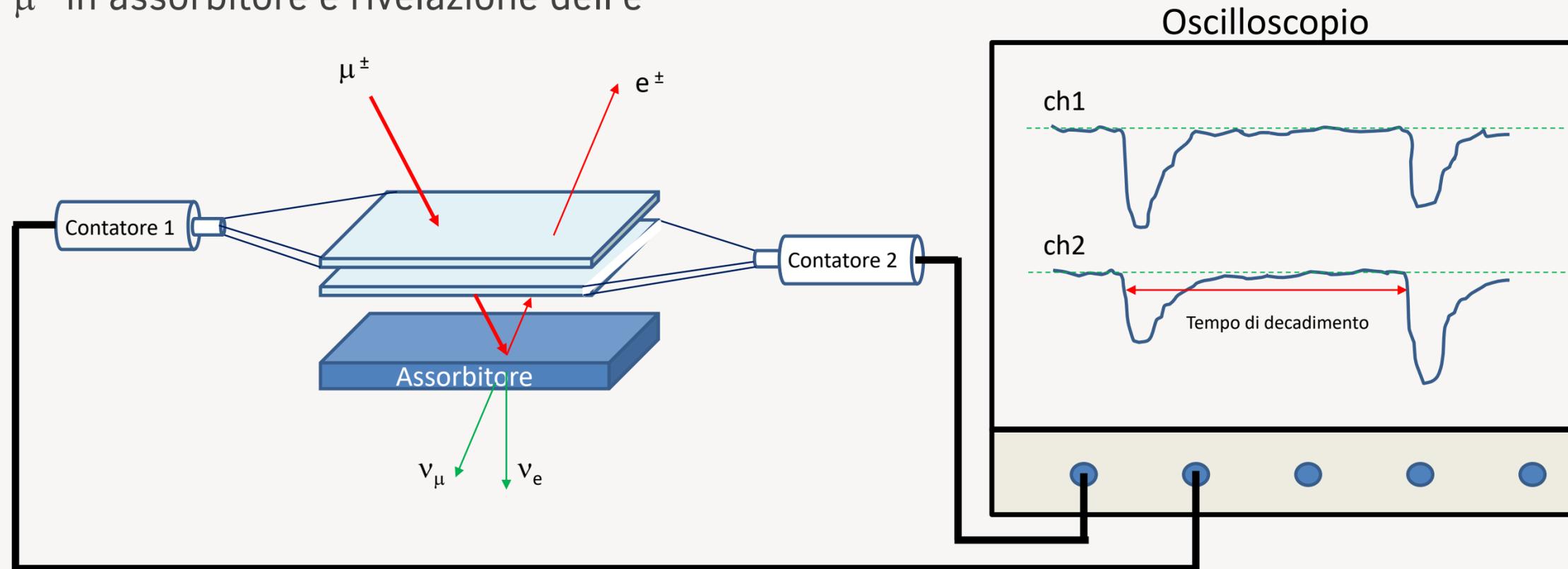
- Affrontare un argomento complesso in laboratorio aiuta a comprenderlo meglio, lavorare in gruppo, utilizzare strumenti e concetti matematici altrimenti astratti;
- La collaborazione con centri di ricerca e dipartimenti universitari è necessaria per rafforzare i rapporti tra istituti di istruzione, centri di ricerca e università;
- L'apparato descritto consente di misurare il tempo di vita medio del muone positivo con incertezza statistica del 1%. Il valore ottenuto è  $1.4 \sigma_\tau$  più grande della media mondiale;
- L'apparato descritto consente infine di misurare la costante  $G_F$  delle interazioni deboli con incertezza statistica migliore del 1% e di gettare le basi per lo studio di effetti secondari come l'influenza del campo coulombiano sul tempo di vita medio del muone negativo in stato legato.

Grazie per l'attenzione!

# Backup slides

# Apparato sperimentale e formazione del trigger

Decadimento del  $\mu^\pm$  in assorbitore e rivelazione dell' $e^\pm$



Dal decadimento viene emesso un elettrone che, se abbastanza energetico ed emesso verso gli scintillatori, attraversa il materiale raggiungendo nuovamente la coppia di scintillatori che ne registrerà l'arrivo. Gli scintillatori sono in coincidenza e questo segnale è inviato ad un oscilloscopio digitale, il cui segnale di trigger è dato quello prodotto nella stessa coppia dall'elettrone di decadimento.

# Toy Monte Carlo

